



HOLOEXPO
science & practice

**20-я Международная конференция
по голографии и прикладным
оптическим технологиям**

2023 12.09–15.09
Сочи, Россия

ТЕЗИСЫ



НОЛОЕХРО 2023

20-я Международная конференция
по голографии и прикладным
оптическим технологиям

Сочи, 12–15 сентября 2023 г.

Тезисы докладов

УДК 681.7+004.315.7+535.317.1
ББК 22.343.4
Г60

Г60 HOLOEXPO 2023 : 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (Сочи, 12–15 сентября) : Тезисы докладов / СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — 497 с.

ISBN 978-5-7629-3209-7

Представлены тезисы докладов 20-й международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO Science & Practice 2023 (Сочи, 12–15 сентября 2023 г.) по следующим тематикам: тенденции развития оптических технологий, дифракционные и голограммные оптические элементы, микрооптика и метаматериалы, структурированный свет и управление параметрами лазерного излучения, системы визуализации и отображения информации, оптические защитные технологии, интегральная фотоника и оптические коммуникации, интерферометрия и метрология, квантовые оптические технологии, технологии микроструктурирования, цифровая голография и методы визуализации, фоточувствительные материалы. В сборник также включены ретроспективные обзоры, представленные на Чтениях памяти С. Б. Одинокова.

НОЛОЕХРО 2023

20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям

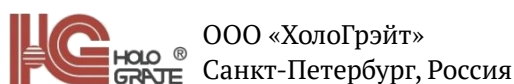
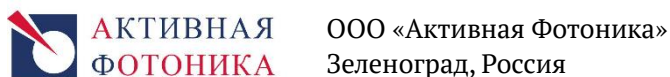
Генеральный спонсор



Бронзовые спонсоры



АО «НТЦ «Атлас»
Москва, Россия



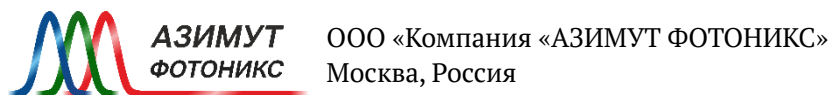
Чеглаков

Андрей

Валерьевич

Чеглаков Андрей Валерьевич

Спонсор



Партнеры



ООО «АОС»
Москва, Россия



ООО «Джеймс Ривер Бранч»
Москва, Россия



ООО «Оптико-голографические приборы»
Москва, Россия

Программный комитет HOLOEXPO Science & Practice

Председатель программного комитета **Владимир Юрьевич Венедиктов**, доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.

Заместитель председателя программного комитета **Леонид Викторович Танин**, доктор физико-математических наук, академик Международной инженерной академии, председатель Совета директоров ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ», Минск, Республика Беларусь.

Заместитель председателя программного комитета **Григорий Исаевич Грейсх**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, Пенза, Россия.

Геннадий Николаевич Вишняков, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ФГУП «Всероссийской научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия.

Николай Владимирович Петров, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории цифровой и изобразительной голографии, профессор Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

Виктор Павлович Корольков, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, Россия.

Евгений Юрьевич Злоказов, доктор физико-математических наук, профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Москва, Россия.

Виктор Михайлович Петров, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

Николай Васильевич Барышников, доктор технических наук, профессор, директор НИИ РЛ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

Владимир Петрович Лукин, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ИОА СО РАН, Томск, Россия.

Андрей Николаевич Путилин, кандидат физико-математических наук, Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

Роман Васильевич Скиданов, доктор физико-математических наук, профессор, Институт систем обработки изображения РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самарский аэрокосмический университет имени С. П. Королева, Самара, Россия.

Чермен Борисович Кайтуков, научный консультант АО «НТЦ «АТЛАС», Москва, Россия.

Николай Валентинович Никонов, доктор физико-математических наук, профессор Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

Валерий Викторович Коротаяев, доктор технических наук, профессор Университета ИТМО, главный редактор Оптического журнала, Санкт-Петербург, Россия.

Юрий Иванович Богданов, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики квантовых компьютеров Физико-технологического института РАН, Москва, Россия.

Станислав Сергеевич Страупе, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Квантовой электроники, Отделение радиофизики, Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова.

Артем Борисович Соломашенко, научный сотрудник, руководитель Лаборатории «Голография и волноводная оптика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Тенденции развития оптических технологий

1. Интеллектуальный голографический синтез и нейроподобные оптико-цифровые дифракционные системы — обзор
Р. С. Стариков 12
2. Интегральная фотоника на подложках ниобата лития и новые принципы генерации, передачи и обработки оптических сигналов
И. В. Ильичев, П. М. Агрузов, А. А. Усикова, М. В. Парфенов, А. В. Тронеv, А. В. Варламов, А. В. Шамрай 14
3. Применение дифракционных оптических элементов для контроля промышленных изделий
П. С. Завьялов, М. С. Кравченко, М. В. Савченко, Е. В. Власов, Д. Р. Хакимов 18
4. Интерференционные методы формирования структурированного света
В. Ю. Венедиктов, Б. А. Евтушенко, А. А. Рыжая, А. А. Севрюгин, А. Л. Соколов, Е. В. Шалымов, Е. К. Юрьева 31

II. Дифракционные и голограммные оптические элементы, микрооптика и метаматериалы

5. Афокальный рефракционно-дифракционный корректор для расширения рабочих спектрального и температурного диапазонов тепловизионной оптики
Г. И. Грейсх, И. А. Левин, С. В. Казин 35
6. Точность восстановления волнового фронта при дифракции на паттерне, сформированном структурированным светом
С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев 41
7. Исследование поляризационной зависимости пропускания бесщелевого спектрографа
Д. М. Ахметов, А. Н. Мельников, Э. Р. Муслимов, Д. Ю. Харитонов, Э. Г. Ибатуллин 52
8. Оптическое дифференцирование второго порядка трехмерного светового пучка с использованием слоистой металлодиэлектрической структуры
Л. Л. Досколович, А. И. Кашапов, Е. А. Безус, Н. В. Головастикова, Д. А. Быков 59
9. Апериодическая дифракционная решетка на основе распределения нулей ζ -функции Римана
А. Е. Мадисон, П. А. Мадисон, Д. А. Козодаев, А. Н. Казанков, В. А. Мошников 69
10. Магнито-индуцированная невязимость в резонансных кремниевых волноводах с высокой степенью поперечного вращения электрического поля
Н. Г. Юхтанов, М. В. Рыбин 74
11. Градиентный метод расчета каскадных ДОЭ и его применение в задачах формирования световых пучков и классификации изображений
Л. Л. Досколович, Д. В. Сошников, Е. В. Бызов, Г. А. Мотз, Н. В. Головастикова 78
12. Применение метода моментов для компенсации aberrаций волнового фронта
П. А. Хорин, С. Г. Волотовский, П. А. Вечканова, С. Н. Хонина 86
13. Синтез компьютерных голограмм для структурирования излучения при заведении в многосердцевидные оптические волокна
А. А. Ревякин, М. Д. Гервасиев, Д. С. Харенко, Н. В. Бочкарев, Н. А. Коляда, С. А. Бабин 99
14. Метод модовой декомпозиции на основе пространственной фазовой модуляции: генерация компьютерных голограмм и обработка результатов
М. Д. Гервасиев, Д. С. Харенко, К. В. Серебренников, Е. В. Подвиллов, Ф. Манджини, М. Ферраро, М. Дзителли, С. Вабниц, С. А. Бабин 103

15. Многослойные интерференционные метаматериалы для субдискретизации и антиалиасной фильтрации в оптической терагерцовой спектроскопии
Н. А. Николаев, А. А. Рыбак, С. А. Кузнецов 107

III. Структурированный свет и управление параметрами лазерного излучения

16. Способ усиления флуоресценции GFP в микрорезонаторе Фабри-Перо под действием фемтосекундных лазерных импульсов
С. А. Вьюнышева, С. А. Мысливец, Н. Н. Давлетишин, Е. В. Еремеева, Е. С. Высоцкий, И. Н. Павлов, А. М. Вьюнышев..... 110
17. Пространственный контроль и структурирование света в нелинейной фотонике
А. М. Вьюнышев, В. Г. Архипкин, А. С. Чиркин 113
18. Структурированный свет для лазерной обработки тонких азополимерных пленок
А. П. Порфирьев, С. Н. Хонина, Н. А. Ивлиев, Д. П. Порфирьев 115
19. Новый тип пучков Лагерра-Гаусса с увеличенной центральной теневой областью
В. В. Котляр, Е. Г. Абрамочкин, А. А. Ковалев, Е. С. Козлова, А. А. Савельева..... 119
20. Эффект Холла в остром фокусе гибридных векторных пучков
В. Д. Зайцев, С. С. Стафеев, В. В. Котляр 122
21. Зондово-оптическая техника нового поколения для современных наномасштабных оптических экспериментов
Д. А. Козодаев, Е. В. Кузнецов, А. О. Погоньшев, М. А. Трусов 125
22. Конфигурируемые вихревые лазерные пучки для оптического манипулирования ансамблями микрочастиц
Д. А. Иконников, С. А. Вьюнышева, Н. Н. Давлетишин, Д. В. Прокопова, Н. Н. Лосевский, С. А. Самагин, С. П. Котова, А. М. Вьюнышев 127
23. Голографический датчик волнового фронта на основе диффузных Фурье – голограмм
В. Ю. Венедиктов, Е. А. Федоров, Д. В. Масыгин..... 130
24. Прототип волоконно-оптического резонаторного гироскопа с делителем 3×3 на сохраняющем поляризацию волокне
К. А. Овчинников, Д. Г. Гилев, В. В. Криштон, М. А. Ветошкин 134

IV. Системы визуализации и отображения информации

25. Проблемы эффективности голографических волноводных дисплеев дополненной реальности
А. Н. Путилин, С. Е. Дубынин, А. В. Морозов, Н. А. Путилин..... 139
26. Искажения виртуального изображения в схемах НМД на волноводных голограммах
Н. А. Путилин, С. Е. Дубынин, А. Н. Путилин, С. С. Копенкин, Ю. П. Бородин 144
27. Фазовый модулятор света для голографической проекции
Ю. П. Гуцо 149
28. Высокопреломляющие стекла для устройств дополненной реальности
Р. О. Алексеев, В. И. Савинков, В. Н. Сигаев 155
29. Медико-психологические особенности деятельности человека в виртуальной среде
Д. В. Глухов, С. А. Калинина, А. Г. Меркулова..... 157
30. Анализ цветового контраста в HUD, системах дополненной реальности
А. М. Березовик, А. А. Степанов 161
31. Особенности и перспективы использования AR-устройств для задач гражданской авиации
Е. Ю. Зыбин, М. А. Леликов, Ю. С. Калюжный 166

32. Способы оценки психофизиологического состояния пилота воздушного судна <i>Г. А. Платошин, И. Б. Мищенко, В. В. Косьянчук, Е. Ю. Зыбин</i>	171
33. Индикатор на лобовом стекле с брэгговскими решетками вывода на фото-термо-рефрактивном стекле <i>С. А. Иванов, Е. С. Мусихина, Н. В. Никоноров, Д. Соболев</i>	175
34. Особенности разработки составных оптических волноводов для устройств дополненной реальности <i>А. Б. Соломашенко, О. Л. Афанасьева, А. С. Кузнецов</i>	179
35. Оценка влияния погрешностей оптического материала на качество изображения AR-устройства на основе волновода <i>О. Л. Афанасьева, А. Б. Соломашенко</i>	183
36. Ахроматические изображающие линзы с несколькими фокусами <i>С. Е. Дубынин, С. С. Копёнкин, А. Н. Путилин, А. В. Морозов, Н. А. Путилин, Ю. П. Бородин, В. В. Дружин</i>	186

V. Оптические защитные технологии

37. Использование оптических эффектов для современных защитных технологий с применением метода струйной печати <i>А. В. Виноградов, Т. Н. Погосян, А. А. Смирнов, Ш. Ф. Мустафин, М. И. Морозов</i>	191
38. Поверхностно-рельефные голограммы. Современное состояние и перспективы <i>А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин</i>	196
39. Тиражируемые защитные метки, содержащие случайный рельеф, и контроль их подлинности <i>А. М. Смолович, Л. Д. Клебанов, И. Д. Лактаев, А. П. Орлов, П. А. Смолович, А. В. Фролов, О. В. Бутов</i>	199
40. Эффекты визуальной динамики на металле: защитные голограммы на основе ЛИППС <i>М. К. Москвин, Е. В. Прокофьев, Д. Д. Учанова, Д. А. Синев, Г. В. Одинцова, В. П. Вейко</i>	204
41. Современные визуальные элементы в защитной полиграфии: переход от рельефно-фазовой голограммы к инновационным комбинированным оптическим защитным элементам <i>Д. Б. Чекунин, А. В. Смирнов</i>	207
42. Сохранение и трансляция исторического и духовного наследия средствами голографии <i>Л. Н. Танина</i>	212
43. Магнитооптические методы защиты документов и защитных голограмм ферромагнитными частицами <i>А. С. Кузнецов, М. В. Волкова</i>	218

VI. Интегральная фотоника и оптические коммуникации

44. Подходы к исследованию эванесцентного поля терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов на Новосибирском лазере на свободных электронах <i>В. Д. Кукотенко, В. В. Герасимов</i>	226
45. Подходы к исследованию эванесцентного поля терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов на Новосибирском лазере на свободных электронах <i>В. С. Герасименко, Н. Д. Герасименко</i>	226
46. Интегральная фотоника на основе анизотропных ван-дер-ваальсовых материалов <i>А. А. Вишневым, Г. Ермолаев, Д. Грудинин, И. Круглов, А. Арсенин, В. Волков</i>	229
47. Моделирование открытого телескопа Кассегрена для задач современной оптической связи <i>А. А. Шустова, С. Г. Алексеев</i>	232
48. Элементы сложносоставных модуляторов для систем квантовой связи на боковых частотах <i>Н. Д. Герасименко, В. С. Герасименко</i>	236

VII. Интерферометрия и метрология

49. Интерференционный микроскоп фазового сдвига для контроля параметров шероховатости поверхностей оптических деталей
И. Ю. Фандиенко, Г. Н. Вишняков, В. Л. Минаев, Р. В. Минаев 240
50. Измерение характеристик тонких пленок оптическим датчиком на основе спиральной зонной пластины
Е. С. Козлова, А. Г. Налимов, В. В. Котляр, С. С. Стафеев 247
51. Гониометрические методы измерений показателя преломления
Г. Н. Вишняков, А. И. Юрин 250
52. Использование вертикально-излучающих диодов в двухдлинноволновой голографической интерферометрии для измерения формы поверхности
И. В. Алексеенко, Д. Клаус 254
53. Опыт применения фазоконтрастного видеомикроскопа для исследования качества отверстий и каналов ситалловых корпусов лазерных резонаторов
И. Ю. Цельмина 257
54. Система прямого монохроматического контроля толщины тонкопленочных интерференционных покрытий, наносимых в вакууме
Ю. О. Просовский, О. Ф. Просовский, А. Н. Исамов, А. Ю. Буднев, В. А. Смольянинов, Д. Г. Денисов 262
55. Современные методы решения проблем и задач создания тонкопленочных структур для различных приложений конструкционной и приборной оптики
А. Н. Исамов, О. Ф. Просовский, Ю. О. Просовский, А. Ю. Буднев, В. А. Смольянинов 266
56. Оценка фазовых шумов лазерного гетеродинного интерферометра для гравитационно-волновой антенны
Е. А. Лавров, С. С. Донченко, Д. А. Соколов 270
57. Гиперхроматические элементы для волоконных конфокальных измерительных систем
М. А. Завьялова, П. С. Завьялов, Д. А. Коверзнев, Д. Р. Хакимов 273
58. Цифровая голографическая интерферометрия для оценки параметров импульсной плазмы при атмосферных условиях
А. М. Кожевникова, И. В. Алексеенко, Д. В. Шитц 281
59. Моделирование процесса дифракции лазерного излучения и исследование погрешностей метода контроля высот шероховатостей субнанометрового уровня оптических поверхностей
Д. Г. Денисов, В. Е. Карасик 285
60. Исследование и анализ процесса дифракции лазерного излучения на мелокомасштабных поверхностных неоднородностях субнанометрового уровня профилей оптических поверхностей
Д. Г. Денисов, В. Е. Карасик 287

VIII. Квантовые оптические технологии

61. Квантовая память в резонаторных схемах: новые подходы и эксперименты
С. А. Моисеев 289
62. Узкополосный источник запутанных фотонных пар телекоммуникационного диапазона длин волн для оптической квантовой памяти и квантового повторителя
К. И. Герасимов, М. М. Миннегалиев, А. Ф. Хайруллин, С. А. Моисеев 293
63. Реализация протокола оптической квантовой памяти на телекоммуникационной длине волны
К. И. Герасимов, М. М. Миннегалиев, С. А. Моисеев 299
64. Алгоритм для программирования реконфигурируемого оптического интерферометра с произвольной архитектурой
С. С. Кузьмин, С. С. Страупе, И. В. Дьяконов, С. П. Кулик 302

65. Генерация состояний Белла с оповещением на интегрально-оптическом чипе из стекла
Н. Н. Скрябин, И. В. Кондратьев, М. А. Дрязгов, Ю. А. Бирюков, С. А. Журавицкий, С. А. Флджян, И. В. Дьяконов, М. Ю. Сайгин, К. В. Тараторин, А. А. Корнеев, С. П. Кулик и С. С. Страупе 307

IX. Технологии микроструктурирования

66. Дополнительные и низкзатратные возможности серийного формообразования оптических поверхностей методом прецизионного реплицирования на основе использования малоусадочных полимерных композиций холодного отверждения
А. В. Лукин, А. Н. Мельников, Е. Г. Лисова, А. И. Садрутдинов, Н. А. Гурин 311
67. Микроструктурированная Pd/PdO нанопленка как сенсорный элемент на водород
А. В. Шелаев, Д. П. Куликова, А. В. Барышев 315
68. Лазерная запись силицидных структур на плёнках Ti с покровным слоем Si
Д. А. Белоусов, Р. И. Куц, В. П. Корольков 318
69. Методы записи радужных голограмм на стеклах
Д. А. Синев, К. Ибрагим, А. Р. Суворов, А. Д. Пивоваров, Е. В. Усынина, Р. М. Мухсинова, Е. А. Авилова, В. А. Домакова, А. Рамос Веласкес, Я. М. Андреева 324
70. О механизме лазерной сверхдифракционной обработки тонкой плёнки молибдена
С. Д. Полетаев 329
71. Круговые и маятниковые делительные машины – универсальное средство изготовления с нанометрической точностью штриховых структур различного назначения для современного оптико-электронного приборостроения и оптической технологии
А. Н. Мельников..... 341
72. Изготовление цветовой калибровочной меры для компьютеризированного гистологического анализа
Г. Р. Сагателян, Е. Р. Пискунова, А. С. Кузнецов 347
73. Новые старые технологии полутонковой литографии
В. П. Корольков, Р. И. Куц, Д. Е. Зайцева, С. К. Голубцов, А. Р. Саметов, В. В. Черкашин 351
74. Формирование синусоидальных голографических решеток методом сухого электронно-лучевого травления резиста
Ф. А. Сидоров, А. Е. Рогожин 360
75. Усовершенствование способа формообразования неклассических нарезных дифракционных решёток на основе применения делительной машины маятникового типа
А. Н. Мельников 363

X. Цифровая голография и методы визуализации

76. Визуализация потенциала действия методом голографической микроскопии
Ю. Н. Захаров, В. В. Дуденкова..... 371
77. Идентификация эрмит-гауссовых и бесселевых мод терагерцового пучка с помощью дифракционных оптических элементов
Н. Д. Осинцева, В. В. Герасимов, Ю. Ю. Чопорова, В. Д. Кукотенко, В. С. Павельев, Б. А. Князев 375
78. Гиперспектральный индекс для обнаружения подкожных кровеносных сосудов
М. М. Хамза, Р. В. Скиданов 380
79. Анализ спектрального состава упругих волн в волноводе из полистирола на основе их цифровых голограмм
А. А. Жихорева, А. В. Белашов, Я. М. Бельтюков, И. В. Семенова 386

80. Использование низкокогерентной и когерентной голографической микроскопии для мониторинга клеточных структур в ходе внешнего воздействия
А. А. Жихорева, А. В. Белашов, П. С. Буторин, Т. Н. Беляева, А. В. Салова, Е. С. Корнилова, И. В. Семенова, О. С. Васютинский 390
81. Метод измерения фазовых искажений когерентной оптической системы на основе пространственно-временного модулятора света
Т. Р. Миниханов, Е. Ю. Злоказов, П. А. Черёмхин 395
82. Исследование процесса формирования оптических вихрей в ближнем поле локализованных хиральных жидкокристаллических структур на дифракционном фазовом микроскопе
А. А. Мисюра, А. В. Черных, К. А. Герасимов, Д. Д. Дармороз, Т. Орлова, Н. В. Петров 398
83. Исследование квантования фазовых распределений при фазовой модуляции посредством цифрового микрозеркального устройства и компьютерной голографии Ли
А. О. Георгиева, А. В. Черных, Н. В. Петров 402

XI. Фоточувствительные материалы

84. Фото- и электро-управляемые дифракционные оптические элементы на основе жидких кристаллов
А. Ю. Бобровский, В. П. Шибяев 410
85. Обесцвечивание объемных голограмм на основе фото-термо-рефрактивного стекла: механизмы и применение
Н. В. Никоноров, А. И. Игнатьев, С. А. Иванов 420
86. Технология Na^+ - Ag^+ ионного обмена в матрице фото-термо-рефрактивного стекла для различных применений фотоники
Е. М. Сгибнев, А. В. Шелаев, Н. В. Никоноров, А. В. Барышев 423
87. Температурные зависимости эффектов дифракции света на регулярных доменных структурах в кристаллах танталата лития
С. М. Шандаров, А. В. Дубиков, Е. Н. Савченков, Д. А. Горбунова, М. А. Федянина, Н. И. Буримов, А. Р. Ахматханов, М. А. Чувакова, В. Я. Шур 426
88. Голографическое и люминесцентное проявление микроскопического движения наночастиц и молекул
Л. Н. Бородина, А. О. Орлова, А. В. Вениаминов 435
89. К вопросу деградации тонких пленок оксида кремния в условиях высоких тепловых нагрузок
А. А. Скворцова, О. В. Володина, А. А. Скворцов 439
90. Голографическое структурирование и формообразование в фотополимерах
Н. Д. Ворзобова, П. П. Соколов 444
91. Модификация оптических свойств халькогенидных пленок ближним ИК лазерным излучением
А. А. Ольхова, А. А. Патрикеева, М. А. Дубкова, П. П. Омельченко, Б. Г. Шульга, М. М. Сергеев 450
92. Эффективная толщина пропускающих голограмм в фотополимерных материалах
С. И. Алиев, Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников 454
93. Влияние пост-экспозиционной термической обработки на свойства фазовых голографических решёток
С. И. Алиев, Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников 459
94. Фотохромные свойства пленки Биохром после 30-летней консервации
Ю. Д. Лантух 464
95. Голографическая решетка с люминесцирующими наночастицами, сформированная в результате фотоиндуцированной диффузии
Л. Н. Бородина, В. Н. Борисов, А. О. Орлова, А. В. Вениаминов 468

96. Аналого-цифровое фотограмметрическое преобразование голографических изображений, записанных с нескольких ракурсов с угловым охватом 4π стерadians
Е. В. Рабош, В. А. Коклюшкин, Н. С. Балбекин, Н. В. Петров 473

ХII. Чтения памяти С. Б. Одинокова

97. Создание, развитие и внедрение научного направления «Защитная голография» в Республике Беларусь
Л. В. Танин 478
98. Наследие Ю. Н. Денисюка в современном мире
О. В. Андреева 483
99. Отечественная дифракционная оптика в зеркале конференций HOLOEXPO 2018–2022
Г. И. Грейсук, А. И. Антонов, Е. Г. Ежов, О. А. Захаров 487
100. Голографическая продукция Славич
Ю. А. Березкина..... 493

Интеллектуальный голографический синтез и нейроподобные оптико-цифровые дифракционные системы — обзор

Р. С. Стариков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В настоящем обзорном докладе рассматриваются современные достижения в области применения методов искусственного интеллекта для синтеза голографических и дифракционных элементов, а также обсуждаются новейшие реализации нейроподобных дифракционных оптико-цифровых систем обработки информации.

Ключевые слова: Компьютерно синтезированные голограммы, Компьютерно синтезированные дифракционные оптические элементы, Глубокое обучение, ИИ, Оптико-цифровые системы, Голографическая обработка информации.

Цитирование: **Стариков, Р. С.** Интеллектуальный голографический синтез и нейроподобные оптико-цифровые дифракционные системы — обзор / Р. С. Стариков // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 12–13.

В настоящее время методы искусственного интеллекта получают всё более широкое практическое применение в самых различных областях. С одной стороны, это обусловлено ростом доступных вычислительных ресурсов для реализации нейронных сетей глубокого обучения, при этом, с другой стороны, такой прогресс предъявляет требования к ещё большему наращиванию таких ресурсов. В данном кратком обзоре обсуждаются актуальные возможности методов глубокого обучения применительно к ряду задач голографии и оптической обработки информации, приводятся новейшие мировые достижения в данной области, а также некоторые оригинальные результаты. В докладе рассматриваются, главным образом, три направления исследований: 1) нейросетевые методы компьютерного синтеза голограмм и дифракционных элементов; 2) нейросетевые методы в цифровой голографии и 3) оптико-цифровые голографические нейроподобные системы обработки информации. Кроме того, отдельно представлены недавние примеры попыток коммерциализации интеллектуальных оптико-голографических систем. В качестве особого передового направления исследований в рассматриваемой области выделены работы по созданию высокопроизводительных средств реализации искусственного интеллекта на базе дифракционных и голографических оптико-цифровых систем; обсуждаются наиболее впечатляющие новейшие экспериментальные результаты в области их создания.

AI-holography and neural-like diffractive optical-digital data processing systems — a review

R. S. Starikov

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

This review presents advances in the application of AI-methods for the synthesis of holographic diffractive elements, and also discusses the newest realizations of neural-like diffractive optical-digital information processing systems.

Keywords: Computer generated holograms, Computer generated diffraction optical elements, Deep learning, AI, Optical-digital systems, Holographic data processing.

Интегральная фотоника на подложках ниобата лития и новые принципы генерации, передачи и обработки оптических сигналов

И. В. Ильичев, П. М. Агрузов, А. А. Усикова, М. В. Парфенов, А. В. Тронеv, А. В. Варламов, А. В. Шамрай

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлен обзор результатов, полученных в лаборатории квантовой электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области интегральной фотоники на подложках ниобата лития. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития интегральной фотоники на основе ниобата лития, в частности применение в квантовых информационных технологиях и увеличение степени интеграции при использовании гибридных тонкопленочных подложек.

Ключевые слова: Интегральная Оптика, Ниобат Лития, Управление Светом.

Цитирование: **Ильичев, И. В.** Интегральная фотоника на подложках ниобата лития и новые принципы генерации, передачи и обработки оптических сигналов / И. В. Ильичев, П. М. Агрузов, А. А. Усикова, М. В. Парфенов, А. В. Тронеv, А. В. Варламов, А. В. Шамрай // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 14–17.

История интегральной фотоники на ниобате лития берет свое начало с середины прошлого века. Несмотря на то, что с момента появления первых интегрально-оптических модуляторов на ниобате лития прошло уже более 50 лет, данная материальная платформа все еще находит свою нишу для практических применений. Ниобат лития (LiNbO_3) по-прежнему является одним из базовых материалов для изготовления интегральных электрооптических модуляторов [1], прежде всего для аналоговых применений в системах радиофотоники и обработки сигналов волоконно-оптических датчиков, где высокая линейность, низкий уровень вносимых шумов и возможность работы с уровнем оптической мощности в несколько сот милливатт являются главными преимуществами по сравнению с полупроводниковыми модуляторами на основе материальных платформ Al_2O_3 и кремния. Помимо электрооптического эффекта ниобат лития обладает целым набором других эффектов: пьезоэлектрическим и акустооптическим, пироэлектрическим, нелинейнооптическим эффектом второго порядка, фоторефрактивным эффектом, позволяющих создавать на подложках ниобата лития сложные интегрально-оптические устройства с широким набором функций.

В докладе представлен обзор результатов, полученных в лаборатории квантовой электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области интегральной фотоники на подложках ниобата лития. Изначально лаборатория занималась оптическими системами обработки информации, и ниобат лития рассматривался как один из базовых фоторефрактивных материалов для реализации мультиплексирования объемных голограмм в системах голографической памяти. Работы в области интегральной оптики на подложках ниобата

лития начались в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 2000 году и были связаны с разработкой перестраиваемого голографического фильтра [2]. За прошедшее время был получен целый ряд оригинальных научных результатов, практически реализованных в виде целой линейки интегрально оптических модуляторов для систем телекоммуникаций, высокоточных волоконно-оптических датчиков и радиофотоники.

В лаборатории первыми в России начали разработки в области интегрально-оптических СВЧ модуляторов. Была разработана оригинальная конфигурация СВЧ электродов и волноводного интерферометра Маха-Цендера, учитывающая технологические возможности ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Все это сделало возможным изготовление СВЧ модуляторов с использованием относительно простого оборудования ФТИ им. А.Ф. Иоффе, без значительных капиталовложений. Достигнутые параметры модуляторов полностью соответствует требованиям современных систем телекоммуникаций (Рис. 1). Чипы модуляторов разработки ФТИ им. А.Ф. Иоффе используются компанией ООО «СМАРТС-Кванттелеком», отечественным разработчиком квантовых систем распределения ключей.

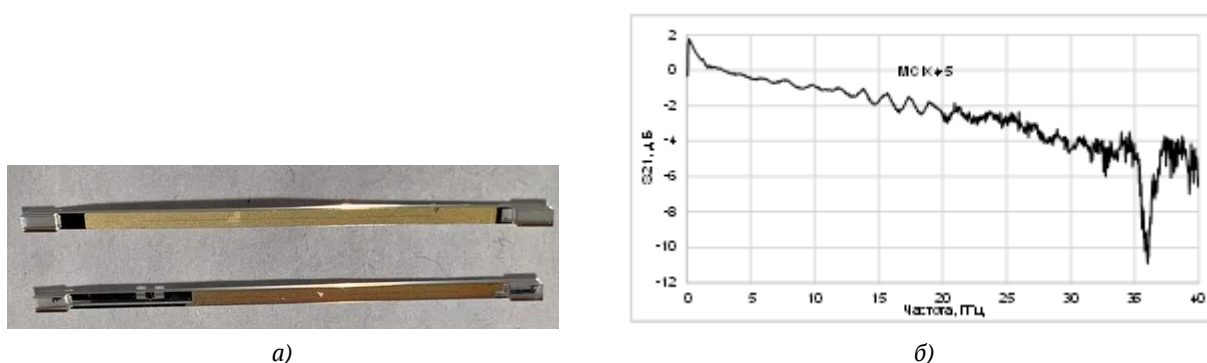


Рис. 1. (а) Чипы СВЧ модуляторов. (б) Частотная характеристика электрооптической модуляции.

Использование интегральной оптики на ниобате лития позволяет решить целый ряд задач в области квантовых систем вычислений и телекоммуникаций. С использованием управляемого интерферометра Маха-Цендера с двойным выходом был продемонстрирован квантовый источник энтропии [3] – аналоговая часть генератора истинных случайных чисел. Полученные результаты являются лучшими в мире для систем, основанных на гомодинном детектирование нулевых колебаний вакуума. Превышение квантового шума над классическим составляет более 12 дБ в полосе частот до 4 ГГц. Столь высокие параметры были получены благодаря точной балансировке интерферометра, с использованием оригинальной зондовой технологии локальной подстройки характеристик интегрально-оптических схем на подложках ниобата лития [4, 5], позволяющей улучшать характеристики уже изготовленных интегрально-оптических чипов.

Другим примером использования интегральной оптики на ниобате лития для решения квантовых задач является разработанная гибридная волноводная структура, повышающая эффективность сверхпроводящего детектора одиночных фотонов [6]. Эффективность

поглощения была повышена на 4 порядка за счет реализации эффективного модового преобразования (Рис. 2) и повышения взаимодействия оптического излучения со сверхпроводящей наноструктурой.

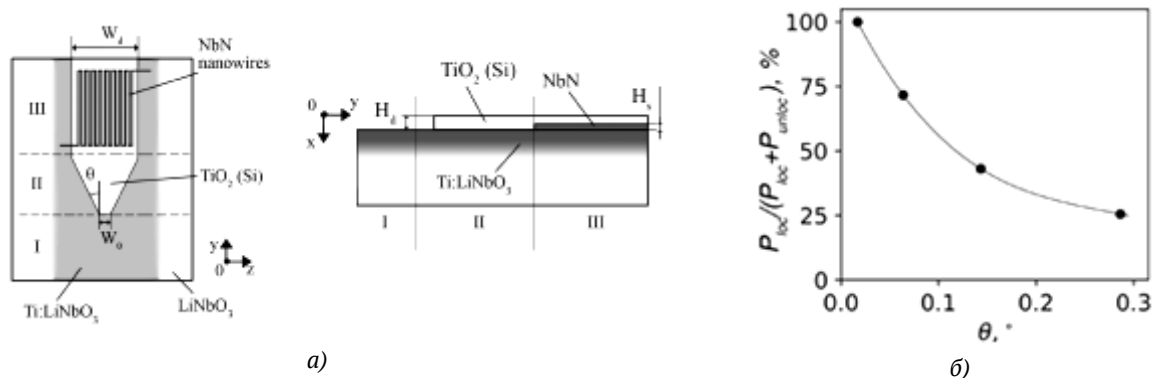


Рис. 2. (а) Сверхпроводящий детектор одиночных фотонов с гибридным преобразователем мод. (б) Зависимость эффективности преобразования от угла тэйпера.

Дальнейшее развитие интегральной фотоники на ниобате лития связано с недавно появившейся технологией тонкопленочного ниобата лития, которая помимо значительного улучшения ключевых характеристик (расширения частотной полосы свыше 100 ГГц и снижения управляющего напряжения ниже 1.5 В), открывает возможности гибридной интеграции с полупроводниковой оптоэлектроникой [7]. Данное направление также активно развивается в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Использование данной технологии позволило повысить эффективность электрооптической модуляции по сравнению со стандартными коммерчески доступными устройствами более чем в 5 раз. Причем для изготовления устройств с малой плотностью интеграции, продемонстрирована возможность использования стандартной контактной фотолитографии. Основной проблемой данного направления, в настоящее время являются относительно высокие оптические потери, по сравнению с коммерчески доступными интегрально-оптическими устройствами на подложках объемного ниобата лития.

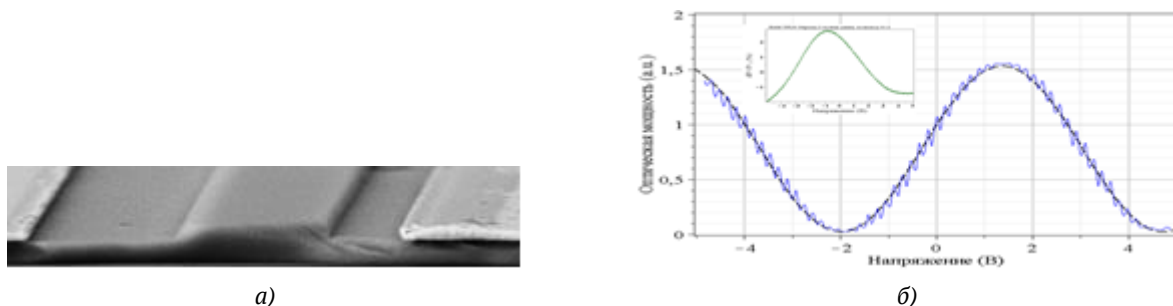


Рис. 3. (а) Фазовый модулятор на основе тонкопленочного ниобата лития. (б) Электрооптическая передаточная характеристика, демонстрирующая эффективное электрооптическое управление.

В заключении можно сказать, что интегральная оптика на ниобате лития все еще сохраняет высокий потенциал и привлекательность в целом ряде новых практических применений. Одни из наиболее ярких и бурно развивающихся направлений является квантовая фотоника, использующая новые принципы генерации, передачи и обработки оптических сигналов.

Благодарность

Результаты в области интегрально-оптических модуляторов на тонкопленочном ниобате лития были получены при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-19-00511.

Список источников

- [1] **Петров, В.М. и др.** Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития // УФН — 2021. — Том 191. — С. 760–780.
- [2] **Шамрай А.В. и др.** Новый метод управления формой спектральной характеристики Брэгговских решеток в электрооптических материалах // Квантовая электроника — 2005. — Том 35. — С. 734–740.
- [3] **Vashukevich, E.A. et al.** Broadband Chip-Based Source of Quantum Noise with Electrically Controllable Beam Splitter // Phys. Rev. Appl. — 2022. — Vol 17. — № 6. — ArtNo: #064039.
- [4] **Parfenov, M.V., et al.** Precise correction of integrated optical power splitters based on lithium niobate substrates by photorefractive effect local excitation // Appl. Phys. B- Lasers Opt. — 2020. — Vol 126. — ArtNo: #93.
- [5] **Tronev A.V., et al.** Local laser oxidation of titanium film for the post-fabrication trimming of photonic integrated circuits // Opt. Mater. Express. — 2022. — Vol 12. — P. 4072 – 4087.
- [6] **Parfenov M., et al.** // IEEE Photonics Journal. — 2021. — Vol 13. — № 6. — P. 1 – 7.
- [7] **Jia, Y., et al.** Ion-cut lithium niobate on insulator technology: Recent advances and perspectives // Appl. Phys. Rev. — 2021. — Vol 8. — ArtNo: #011307.

Integrated photonics on lithium niobate substrates and new principles of generation, transmission and processing of optical signals

*I. V. Ilichev, P. M. Agruzov, A. A. Usikova, M. V. Parfenov, A. V. Tronev, A. V. Varlamov,
A. V. Shamrai*

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

The report presents an overview of the results obtained in the Laboratory of Quantum Electronics of the Ioffe Institute in the field of integrated photonics on lithium niobate substrates. The prospects for the further development of integrated photonics based on lithium niobate are discussed, in particular, their application in quantum information technologies and an increase in the degree of integration when using hybrid thin-film substrates.

Keywords: Integrated Photonics, Lithium Niobate, Light Control.

Применение дифракционных оптических элементов для контроля промышленных изделий

П. С. Завьялов^{1,2}, М. С. Кравченко¹, М. В. Савченко¹, Е. В. Власов¹, Д. Р. Хакимов¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия

Применение оптических дифракционных элементов (ДОЭ) в составе промышленных оптико-электронных комплексов позволяет повысить точность, надежность и производительность контроля ответственных деталей и узлов, а также исключить «человеческий фактор». Как правило, такие ДОЭ представляют собой фокусаторы в наборы колец, полос, дуг, которые при совместном использовании со специальными объективами позволяют получать изображение поверхности контролируемого образца (внутренней или наружной) и определять размеры, дефекты, отклонения от прямолинейности и плоскостности. В работе представлены результаты по расчету, изготовлению и применению таких ДОЭ при реализации промышленных систем автоматизированного контроля с достигнутыми погрешностями измерений (0,1 - 10 мкм и менее) и высоким быстродействием (1 шт./с).

Ключевые слова: Дифракционные оптические элементы, Фокусаторы, Метод структурного освещения, Метод светового сечения, Конфокальный датчик.

Цитирование: Завьялов, П. С. Применение дифракционных оптических элементов для контроля промышленных изделий / П. С. Завьялов, М. С. Кравченко, М. В. Савченко, Е. В. Власов, Д. Р. Хакимов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 18–30.

Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) представляют собой математически заданные и перенесенные с помощью лазерных технологий на поверхность оптических материалов микроструктуры, которые позволяют изменять характеристики проходящего через них света определенным образом. Они широко используются в оптико-электронных системах для контроля геометрических параметров различных изделий с высокой точностью для обеспечения качества их производства. Как правило, в таких системах метод структурного освещения является эффективным и обладает высокой чувствительностью к изменениям геометрии 3D-объектов [1-4].

В КТИ НП СО РАН на протяжении последнего десятилетия предложены и реализованы методы структурного освещения на базе ДОЭ при разработке широкого спектра систем контроля ответственных промышленных изделий. В работе представлен обзор, описаны особенности оптических схем и приведены результаты технических характеристик приборов на основе ДОЭ.

Контроль параметров протяженных отверстий на базе ДОЭ

В работах [5, 6] был предложен высокопроизводительный оптико-электронный метод контроля отверстий с использованием дифракционного фокусатора в кольцо. Данный метод позволяет создать малогабаритный зонд для контроля 3D формы отверстий.

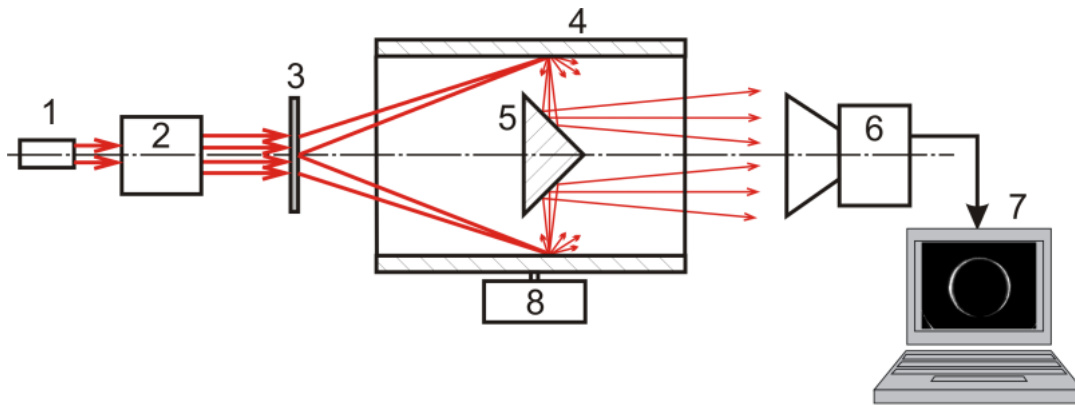


Рис. 1. Принцип контроля отверстий: 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – ДОЭ; 4 – цилиндрический канал; 5 – коническое зеркало; 6 – камера; 7 – компьютер; 8 – устройство перемещения детали

Метод измерения заключается в формировании узкого светового кольца на внутренней поверхности изделия, приёме и обработке изображения освещенного участка поверхности. Свет, рассеянный от стенки отверстия, попадает на матрицу камеры благодаря коническому зеркалу. Сканирование всей поверхности осуществляется посредством перемещения объекта вдоль оси (рис. 1).

В предлагаемом методе измерения важнейшей задачей является фокусировка светового пучка в узкое кольцо (рис. 2). В качестве такого оптического элемента был использован дифракционный фокусатор [7], со следующей фазовой функцией:

$$\phi(r) = -k\sqrt{f_0^2 + (r - r_0)^2}, \quad 0 \leq r \leq a, \quad (1)$$

где r – полярный радиус; f_0 – фокусное расстояние; a – радиус фокусатора, r_0 – радиус кольца фокусировки.

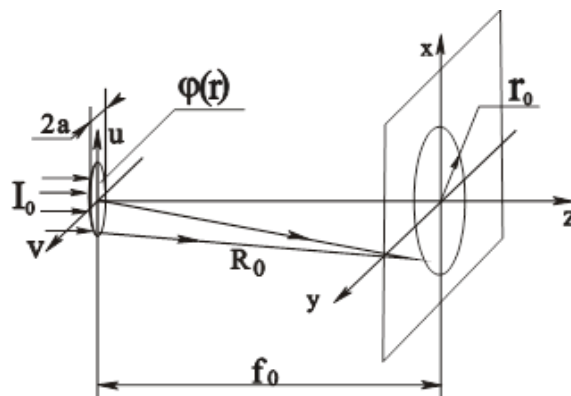


Рис. 2. Геометрия фокусировки в кольцо

Использование ДОЭ позволяет добиться высокой точности измерений при одновременной минимизации габаритов оптической схемы зонда.

Разработана конструкция компактного зонда для бесконтактного контроля протяженных отверстий (рис. 3). В качестве источника света используется полупроводниковый лазер с волоконным выходом (длина волны 660 нм, мощность 80 мВт). Для введения излучения в зонд используется волоконный кабель 2, который прокладывается внутри и снаружи зонда и выводится в его центр – на оптическую ось. Расходящийся лазерный пучок коллимируется сферическим зеркалом 4 и освещает ДОЭ 3. Далее излучение выходит через окна 6 в корпусе зонда и попадает на контролируемое отверстие, формируя на его поверхности узкое световое кольцо. Наблюдение за освещенной поверхностью производится с помощью конического зеркала 5, линзы 7 и эндоскопа 8. Корпус зонда выполнен в виде трубки диаметром 10 мм и длиной более 1 м.

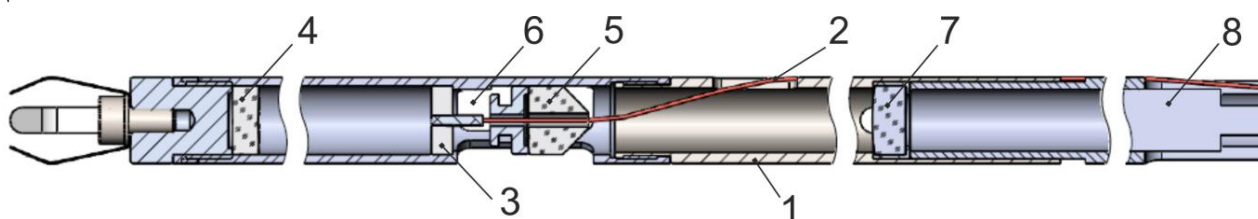


Рис. 3. Конструкция зонда: 1 – корпус; 2 – оптоволоконно; 3 – ДОЭ; 4 – сферическое зеркало; 5 – коническое зеркало; 6 – окна в корпусе зонда; 7 – линза; 8 – эндоскоп

Разработанная оптическая схема зонда имеет высокую чувствительность к изменению геометрии контролируемого канала (около 4 мкм на 1 пиксель изображения) и позволяет сканировать отверстия диаметром от 12,6 до 13,2 мм.

На рис. 4 приведено реальное изображение кольцевой метки, полученное в процессе сканирования канала нарезного ствола. Видны три области, в которых метка экранируется на деталях корпуса зонда. Так как съемка осуществляется в движении, то спекл-шум на изображении достаточно хорошо сглаживается.

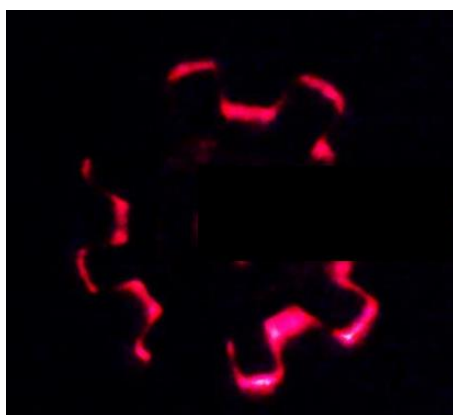


Рис. 4. Изображение кольцевой метки, полученное при сканировании нарезного ствола диаметром 12,7 мм

В рамках работ с ОАО «Завод им. В. А. Дегтярёва» разработана и изготовлена установка для контроля прямолинейности канала ствола (шифр «Струна») [8, 9]. Результаты измерений выводятся оператору в виде 3D кривой, иллюстрирующей искривление оси канала. При этом указывается значение и координаты (по длине и углу) наибольшего отклонения оси (рис. 5).

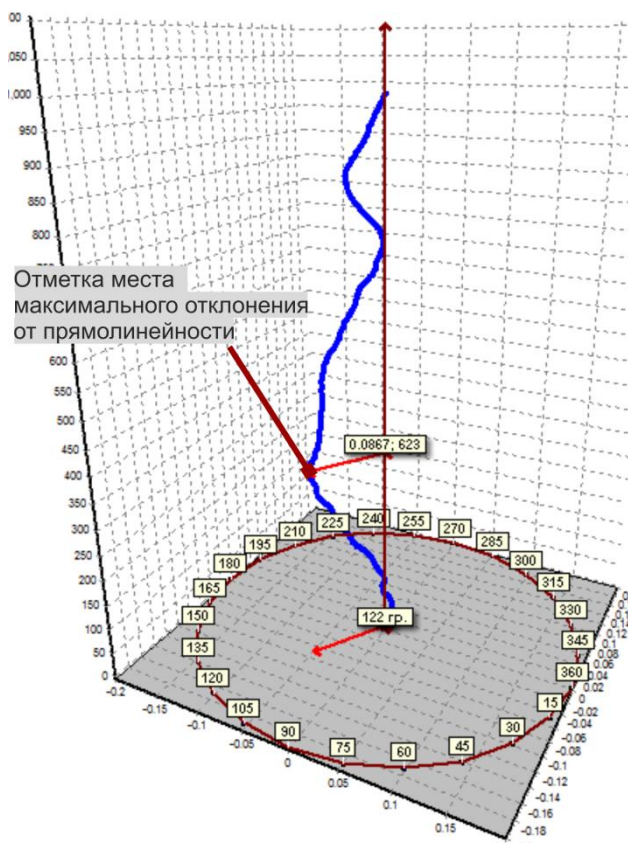


Рис. 5. Результаты сканирования канала ствола: 3D визуализация формы оси

Контроль дистанционирующих решеток

Для контроля таких сложных 3D-объектов как дистанционирующие решетки (ДР) тепловыделяющих сборок (ТВС) предложен метод структурного освещения на основе мультикольцевых фокусаторов (МКФ) [10, 11]. Метод обеспечивает контроль следующих параметров шестиугольных ДР: диаметров ячеек и отверстий под канал, формируемых их выступами – пуклёвками; расстояний между центрами соседних ячеек; сдвигов центров ячеек относительно номинального положения по чертежу; габаритных размеров ТВС. Для квадратных ДР вместо диаметров контролируются расстояния между противоположными пуклёвками.

В предложенном методе увеличение быстродействия достигается путем освещения внутренней поверхности 3D объекта мультикольцевым световым зондом, который может быть создан на основе ДОЭ. При этом измерение одной ячейки ДР по всей длине производится за один кадр, содержащий всю информацию о её геометрии. Также при таком мультикольцевом структурном освещении не имеет принципиального значения количество

и расположение пуклёвок ячейки, поэтому метод позволяет контролировать геометрические параметры как шестигранных (российских), так и квадратных (зарубежных) дистанционирующих решеток.

Суть метода поясняется на рис. 6. Структурное освещение в виде набора колец формируется специально рассчитанным ДОЭ – МКФ, который фокусирует падающее на него лазерное излучение в систему колец равного диаметра, расположенных вдоль оси Z ячейки с некоторым шагом Δz . Освещенная поверхность ячейки проецируется на фотоприёмную матрицу камеры с помощью специального объектива для контроля отверстий, имеющего большую кривизну поля и дисторсию. Он фокусирует различные сечения по глубине в плоскость фотоприемника, при этом, чем ближе сечение объекта, тем больше радиус его изображения. Для измерения геометрических параметров всех ячеек и параметров решетки в целом используется сканирующий двухкоординатный стол для её перемещения в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы.

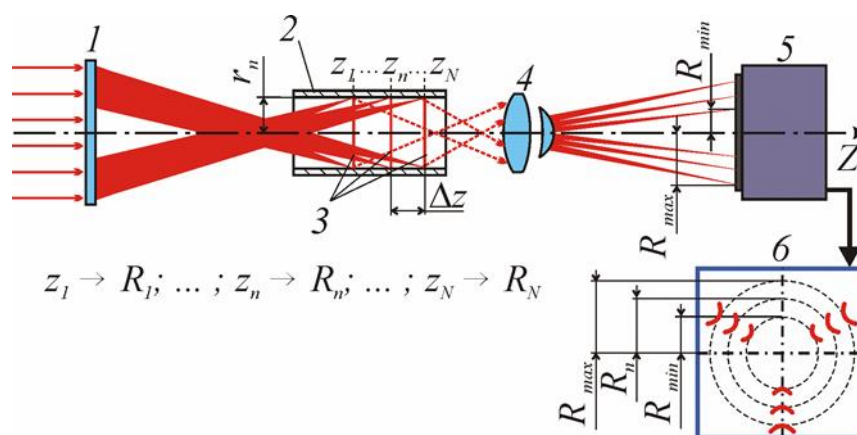


Рис. 6. Иллюстрация метода контроля ДР на основе МКФ: 1 – МКФ; 2 – контролируемая ячейка; 3 – световые кольца; 4 – объектив для контроля отверстий; 5 – камера; 6 – изображение ячейки; R_{min} и R_{max} – минимальный и максимальный радиусы изображения; Δz – шаг колец; $2r_n$ – диаметр ячейки

К МКФ предъявляются следующие требования. Для обеспечения информативности контроля по длине пуклёвки необходимо контролировать от 10 до 15 сечений, поэтому МКФ должен формировать на пуклёвках такое же количество колец с шагом $\Delta z = 0,5 - 1$ мм. Диапазон фокусировки кольца в радиальном направлении должен соответствовать допуску на положение центра ячейки (0,15 - 0,3 мм).

Дифракционные элементы, фокусирующие излучение в систему колец, можно создать двумя способами. Во-первых, можно разбить поверхность дифракционного элемента на радиальные сегменты, каждый из которых будет создавать одно световое кольцо. Во-вторых, можно создать дифракционный элемент, который всей поверхностью формирует набор световых колец вдоль оптической оси. В этом случае он работает как голограмма, а передаточная функция такого МКФ имеет следующий вид:

$$H(\rho) = \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{J_i} \cdot \exp \left[jk \sqrt{(\rho + r_0)^2 + (f_0 + i \cdot \Delta z)^2} \right], \quad \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}, \quad (2)$$

где J_i – относительная интенсивность i -го светового кольца; r_0 – радиус колец, f_0 – фокусное расстояние МКФ; Δz – шаг колец; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Такие МКФ с диаметром 45 мм могут генерировать до 20 узких световых колец равного диаметра с шириной 50 – 100 мкм и шагом по глубине в пределах от 0,5 до 1 мм. На рис. 7а показана структура разработанных МКФ.

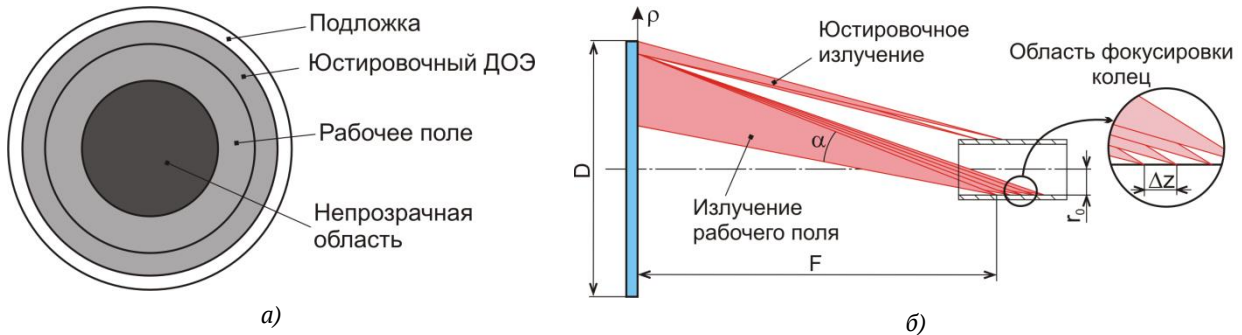


Рис. 7. Дифракционный оптический элемент: а) структура ДОЭ; б) ход лучей МКФ

Кроме рабочего поля, МКФ имеет в центре непрозрачную область, а на периферии – дополнительный юстировочный элемент. Непрозрачная область в центре выполняет несколько функций. Во-первых, она не пропускает прямое излучение от лазера в проекционный объектив. Во-вторых, эта область уменьшает угловую апертуру α рабочего поля (рис. 7б), вследствие чего освещение поверхности производится излучением, в котором отсутствуют скользящие лучи. Юстировочный ДОЭ создает два кольца того же диаметра, что и рабочее поле (рис. 7б), однако в этом случае юстировочные лучи не пересекают оптическую ось. Таким образом, при наличии ячейки в зоне контроля эти лучи не попадают в апертуру проекционного объектива, и поэтому юстировочные кольца не наблюдаются. Когда же ячейка отсутствует, в апертуру объектива не попадает рассеянное от ячейки излучение рабочего поля ДОЭ. При этом видны два юстировочных кольца, по которым можно настраивать приёмную оптическую часть по отношению к освещающей оптической системе.

На рис. 8 показаны зарегистрированные ПЗС-линейкой (ширина пикселя 14 мкм) распределения интенсивности, формируемые изготовленными ДОЭ. В рабочее поле намеренно введен признак (пропуск одного кольца посередине, рис. 8а), позволяющий при обработке изображений безошибочно пронумеровать световые полосы.

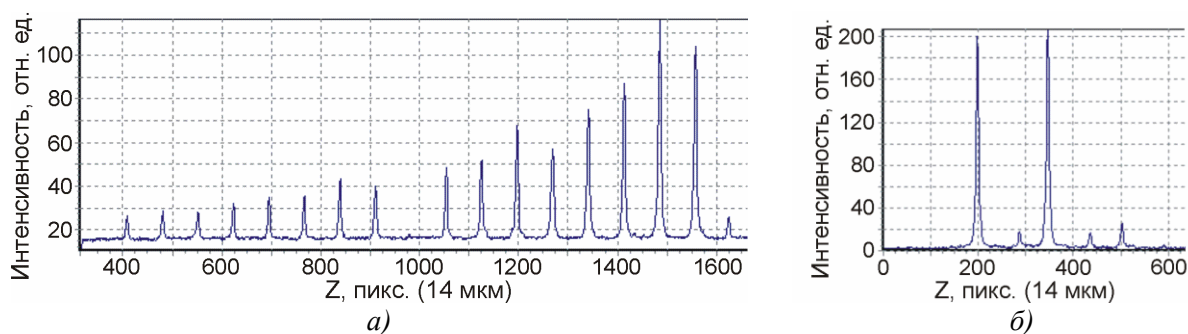


Рис. 8. Экспериментально полученные распределения интенсивности МКФ, генерирующего 16 колец с шагом $\Delta z = 1$ мм (а), два юстировочных кольца (б)

На основе предложенного метода разработаны и созданы системы контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток («Решетка-Н», 2 ед.), которые находятся в эксплуатации в ПАО «Новосибирский завод химконцентратов», г. Новосибирск.

Контроль внешнего вида оболочек ТВЭЛ

Задача автоматического обнаружения дефектов (наколов, царапин, вмятин) с определением их размеров является исключительно важной при контроле поверхности оболочек ТВЭЛ, изготовленных из циркониевого сплава. Диаметр оболочек равен примерно 9 – 14 мм, а длина 3,8 – 4,5 м. Однако требования к чувствительности обнаружения дефектов на оболочке ТВЭЛ достаточно жесткие. При высокой скорости контроля (скорость движения около 170 мм/с) требуется обнаруживать дефекты глубиной несколько десятков микрон. Существующие установки контроля оболочек используют токовихревой метод обнаружения дефектов, который позволяет только определять наличие дефектов, а их обмер осуществляется на отдельной позиции на высокоточном приборе с изъятием ТВЭЛ из конвейера.

Известен оптический метод светового сечения, который широко применяется для контроля формы протяженных объектов [12]. Суть метода заключается в формировании на поверхности объекта световой полосы, лежащей в плоскости, перпендикулярной продольной оси объекта. Регистрация изображения производится с помощью камеры, расположенной под некоторым углом к плоскости полосы. Недостатком данного метода является низкая производительность в случае контроля изделий с большой кривизной формы поверхности, таких как оболочки ТВЭЛ. Зарегистрированное изображение будет иметь форму дуги и, следовательно, будет занимать большое количество строк, а считываемые кадры – большой объем информации, значительная часть которой, при наличии мелких дефектов, будет бесполезной. Это обстоятельство ограничивает производительность контроля и применение данного метода для контроля оболочек ТВЭЛ.

С целью преодоления этих ограничений исследован высокопроизводительный оптико-электронный метод контроля с определением глубины дефектов, основанный на использовании в качестве формирователя световой полосы дифракционного ДОЭ [13]. Трехмерная конфигурация освещающего пучка позволяет минимизировать объем считываемой информации и регистрировать только отклонения формы поверхности от

номинальной (дифференциальный режим считывания). При этом высокая производительность контроля достигается за счет обработки малоразмерных кадров изображений ($20 \div 100$ строк).

На рис. 9 представлена структурная схема одного канала устройства, реализующего предлагаемый метод контроля с определением глубины дефектов. Блок контроля оболочек ТВЭЛ содержит четыре идентичных канала (рис. 10).

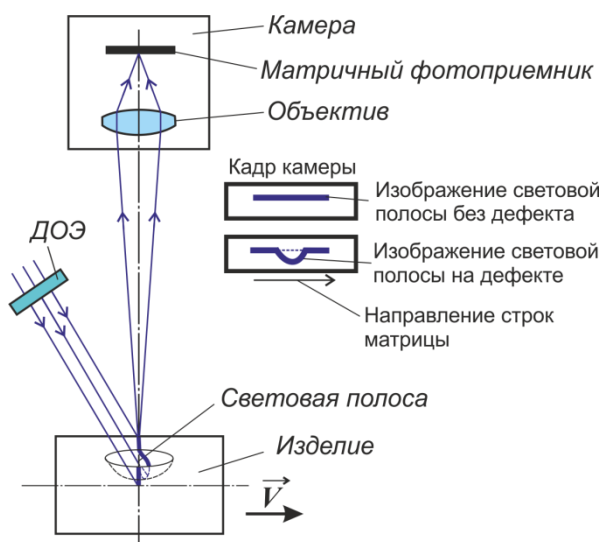


Рис. 9. Структурная схема оптического канала, реализующего метод светового сечения с использованием ДОЭ

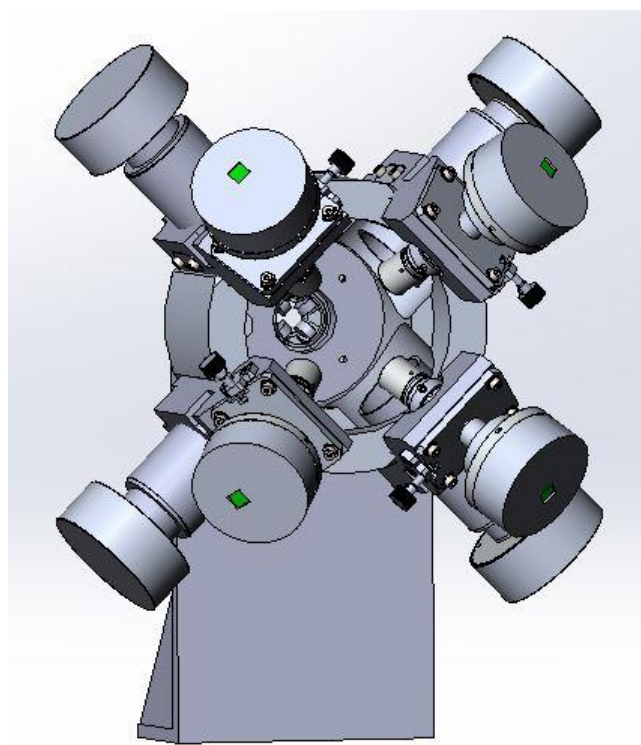


Рис. 10. 3D-модель блока светового сечения для контроля оболочек ТВЭЛ

Для измерения глубины дефектов необходимо, чтобы ДОЭ формировал на цилиндрической поверхности световую дугу – фрагмент окружности, диаметр которой равен диаметру контролируемого цилиндра D_c . При использовании 3 – 4 оптических каналов угловой размер дуги должен быть $90^\circ \div 120^\circ$. Известны методы аналитического расчета фазовой функции дифракционного фокусатора в дугу окружности [7, 14].

Однако, нами использовался более простой и универсальный метод расчета на основе численного решения интеграла Френеля – Кирхгоффа. Данный метод подразумевает дискретизацию формируемой световой картины. Формируемое поле задается в виде набора из N точек (δ -функций), лежащих на дуге окружности с некоторым шагом Δ друг относительно друга (рис. 11).

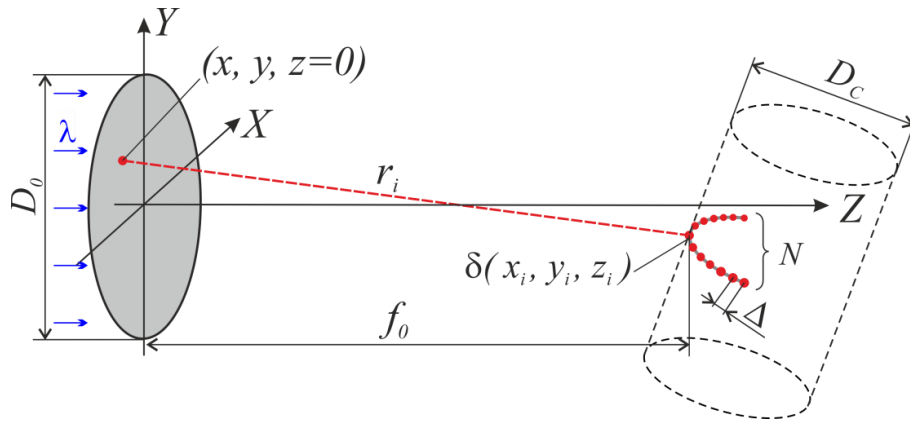


Рис. 11. Расчет ДОЭ на основе преобразования Френеля – Кирхгофа

Поле в каждой точке ДОЭ описывается суперпозицией N импульсных откликов:

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^N \sqrt{I_i} \cdot h_i(x, y), \quad (3)$$

где I_i – относительные интенсивности точек; $h_i(x, y)$ – импульсный отклик свободного пространства.

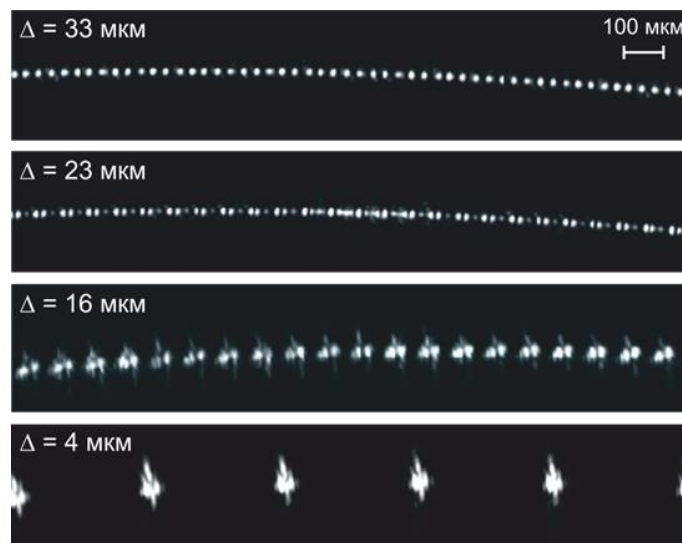


Рис. 12. Изображения световых дуг, сформированных изготовленными ДОЭ с разным шагом дискретизации Δ

Высокая производительность метода достигается за счет регистрации и обработки малоразмерных кадров изображений (750×24 пикселей), содержащих информацию о форме и глубине дефектов. Частота кадров – около 5000 в секунду. Обработка кадров с субпиксельной точностью производится в реальном времени, аппаратно в устройстве обработки камеры на базе программируемой логики. По интерфейсу USB 2.0 в промышленный компьютер передается готовая информация о глубине и амплитуде сигнала в каждой точке регистрируемого профиля поверхности. На рис. 13 приведены фрагменты результатов работы блока светового сечения.

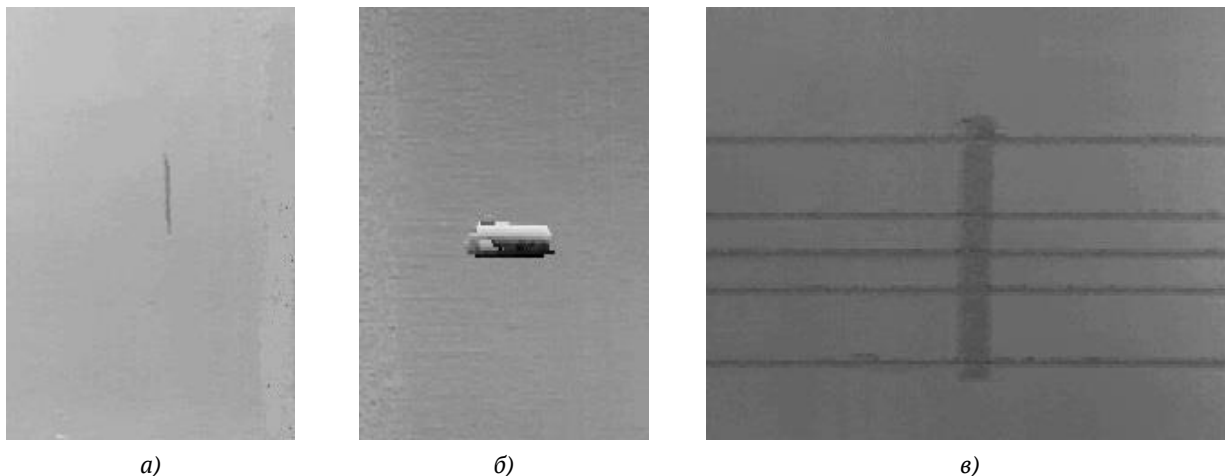


Рис. 13. Фрагменты изображений поверхности оболочек с дефектами, полученные блоком светового сечения: (а) царапина; (б) глубокий накол; (в) нанесенная лазером маркировка.

Далее отдельные профили складываются в общую двухмерную карту поверхности трубы, по которой производится поиск участков с отклонениями высот, превышающими установленные допусковые значения. В случае обнаружения подобных участков установка передает в систему управления технологической линии сигнал «Брак» или «Условный брак» (в зависимости от указанных в базе данных требований по разбраковке дефектов). Если не зафиксировано выхода высот профиля за установленные пределы, то передается сигнал «Годен».

Контроль профиля поверхности

Также ДОЭ широко используется в разрабатываемых в КТИ НП СО РАН (г. Новосибирск) волоконных конфокальных датчиках на основе хроматического кодирования для измерения малых расстояний. Ключевой особенностью таких датчиков является использование дисперсионных или дифракционных свойств оптических элементов, когда фокусировка света осуществляется не в одной точке, а с разделением по длине волны на разных расстояниях. Так, при использовании ДОЭ фокус для света с более короткими длинами волн находится на большем расстоянии от элемента чем фокус более длинноволновой части спектра. Этот принцип позволяет кодировать разные расстояния до поверхности определенным цветом.

Как правило, источники света с повышенными энергетическими характеристиками имеют ширину спектра около $\Delta\lambda = 20 - 40$ нм, поэтому применение дифракционной оптики для таких источников света является практически единственным вариантом создания гиперхроматических объективов (ГХО) с протяженным хроматическим участком Δz .

Как известно, для одиночного ДОЭ с фокусным расстоянием f справедливо следующее соотношение:

$$\frac{\Delta z}{f'} \approx \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (4)$$

Из этого соотношения следует, что в случае использования суперлюминесцентного светодиода а с $\lambda = 780 \pm 20$ нм можно получить хроматический отрезок порядка 5 % от f' .

Недостатком использования одиночного ДОЭ является то, что регулировать хроматический участок Δz (а значит и диапазон измерения) можно только изменением фокусного расстояния ДОЭ, а это не всегда удобно, так как при этом также необходимо изменять апертуру ДОЭ и габариты всего конфокального датчика. Поэтому совместно с ДОЭ можно использовать одиночные линзы с разными фокусными расстояниями $f'_л$. При этом линза ввиду того, что спектральный диапазон достаточно мал $\Delta \lambda \sim 20 - 40$ нм, не вносит существенных искажений в спектральное разложение, так как хроматизм ДОЭ существенно выше хроматизма линзы. Оптическая сила всего ГХО:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_{\text{ДОЭ}}} + \frac{1}{f'_л} \quad (5)$$

Существенно, что расчет ДОЭ для гибридного объектива может осуществляться с учетом сферической аберрации одиночной линзы. На этапе проведения расчетов в фазовую функцию ДОЭ вносится добавка, компенсирующая сферическую аберрацию линзы ΔW_s .

На основе рассчитанных и изготовленных ГХО созданы волоконные конфокальные датчики на основе хроматического кодирования, чувствительность которых к смещениям контролируемых объектов составляет 0,1 мкм и менее [17,18].

Заключение

Предложен и исследован ряд методов структурного освещения и измерения малых расстояний до объектов на основе дифракционных оптических элементов. Применение ДОЭ, фокусирующих лазерное излучение в геометрические фигуры определенной конфигурации (кольца, дуги, линии), позволяет оптимальным образом согласовать характеристики структурного освещения с геометрией контролируемого объекта. Кроме того, показано, что использование ДОЭ, изготовленных на прецизионных лазерных записывающих системах [15], позволяет существенно увеличить точность измерений. Погрешность измерения геометрических параметров может при этом достигать от 4 до 10 мкм, расстояний – менее 0,1 мкм.

На основе разработанных методов контроля на базе ДОЭ созданы и внедрены в производство ряд оптико-электронных систем: система контроля прямолинейности каналов стволов «Струна» для ОАО «Завод им. В. А. Дегтярёва», системы контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток («Решетка-Н») для ПАО «НЗХК», установка для бесконтактного контроля геометрических параметров и измерений наружных дефектов труб для АО «ЧМЗ» и ряд других.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки России в части проекта АААА-А21-121011490030-4 и проекта АААА-А20-120102190007-5.

Список источников

- [1] **Geng, J.** Structured-light 3D surface imaging: a tutorial //Advances in optics and photonics. – 2011. – Т. 3. – №. 2. – С. 128-160. DOI:10.1364/AOP.3.000128.
- [2] **Grosse, M.** Fast data acquisition for three-dimensional shape measurement using fixed-pattern projection and temporal coding /M. Grosse, M. Schaffer, B. Harendt, R. Kowarschik // Opt. Eng. – 2011. – Vol. 50(10). – P. 100503-1 - 100503-3.– DOI:10.1117/1.3646100.
- [3] **Zhao, Y.** 3D mouse shape reconstruction based on phase shifting algorithm for fluorescence molecular tomography imaging system / Y. Zhao, D. Zhu, R. Baikejiang, C. Li // Appl. Opt. – 2015. – Vol. 54(32). – P. 9573-9582. – DOI:10.1364/AO.54.009573
- [4] **Steckenrider, J.J.** High-resolution moiré interferometry for quantitative low-cost, real-time surface profilometry / J.J. Steckenrider, J.S. Steckenrider // Appl. Opt. – 2015. – Vol. 54(28). – P. 8298-8305. – DOI:10.1364/AO.54.008298
- [5] **Патент № 2245516** РФ. Устройство контроля отверстий деталей / Ю. В. Чугуй, Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов, В. Г. Никитин, А. Р. Саметов. – Оpubл. 10.10.2004.
- [6] **Zavyalov, P. S.** et al. Using diffractive optical elements for industrial products geometrical parameters inspection //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1096. – №. 1. – С. 012009. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012009>.
- [7] **Сойфер, В.А.** Методы компьютерной оптики / Ред. В. А. Сойфер. – Москва: Физматлит, 2000. – 688 с.
- [8] **Zavyalov, P. S.** Light section method of alignment control for weapon barrels / P. S. Zavyalov, D. R. Khakimov, A. A. Gushchina, A. V. Ermolenko, D. V. Skokov, V. Yu. Sartakov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2020. – V. 56. – No. 4 – P. 375-385. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S8756699020040160>.
- [9] Патент № 2721716 РФ. Устройство для контроля отверстий деталей / Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов А.В. Белобородов, А.В. Ермоленко, Д.В. Скоков, Д.Р. Хакимов. – Оpubл. 21.05.2020.
- [10] **Zavyalov, P.** 3D Hole Inspection Using Lens with High Field Curvature / P. Zavyalov // Measurement science review. – 2015. – Vol. 15(1). – P. 52 -57. – DOI:10.1515/msr-2015-0008.
- [11] **Завьялов, П.С.** Трехмерный контроль дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов / П. С. Завьялов, Ю. А. Лемешко, Л. В. Финогенов, Ю. В. Чугуй // Автометрия. – 2008. – Т.44, № 2. – С. 23–31.
- [14] Завьялов, П. С. и др. Применение дифракционных элементов для повышения производительности систем контроля цилиндрических поверхностей //Автометрия. – 2017. – Т. 53. – №. 5. – С. 40-47. – DOI: 10.15372/AUT20170504.
- [15] Golub M. A. et al. Computational experiment for computer-generated optical elements //Innovative Optics and Phase Conjugate Optics. – SPIE, 1991. – Т. 1500. – С. 194-206.
- [16] **Верхогляд, А. Г.** Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, А. Е. Каличкин, С. А. Кокарев, В. П. Корольков// Датчики и системы. – 2015. – Т. 9–10. – С. 45–52.
- [17] **Завьялова, М. А.** Экспериментальные исследования волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования / М. А. Завьялова, П. С. Завьялов, М. В. Савченко // Фотоника. – 2021. – Т. 15, № 7. – С. 598-609. – DOI 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.7.598.609
- [18] **Завьялова, М.А.** Моделирование и расчет гиперхроматических объективов для волоконных конфокальных датчиков поверхности на основе метода хроматического кодирования / М. А. Завьялова, П. С. Завьялов // Фотоника. – № 5 (65). – 2017 г. – стр. 80-90. – DOI: 10.22184/1993-7296.2017.65.5.80.90

Use of diffractive optical elements for control of industrial products

P. S. Zavyalov^{1,2}, M. S. Kravchenko¹, M. V. Savchenko¹, E. V. Vlasov¹, D. R. Khakimov¹

¹ Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The use of optical diffractive elements (DOE) as part of industrial optoelectronic complexes makes it possible to increase the accuracy, reliability and performance of monitoring critical parts and assemblies and eliminate the "human factor". As a rule, such DOEs are focused into sets of rings, strips, and arcs, which, when used in conjunction with special lenses, make it possible to obtain an image of the surface of a controlled sample (internal or external) and determine dimensions, defects, deviations from straightness and flatness. The paper presents the results on the calculation, manufacture and application of such DOEs in the implementation of projection, shadow, television methods, as well as the structured light method with achieved measurement errors (0.1 - 10) μm and high speed (1 pc/s).

Keywords: Diffraction optical elements, Focused, Structured light method, Light section method, Confocal sensor.

Интерференционные методы формирования структурированного света

В. Ю. Венедиктов¹, Б. А. Евтушенко¹, А. А. Рыжая¹, А. А. Севрюгин¹, А. Л. Соколов²,
Е. В. Шалымов¹, Е. К. Юрьева¹

¹ Кафедра лазерных измерительных и навигационных систем, Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

² Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК «СПП»), Москва, Россия

В данной статье описывается экспериментальное исследование способа формирования оптического вихря с использованием лучей, отраженных от комбинации двух ретрорефлекторов или кубических угловых отражателей (КУО) со специальным интерференционным фазосдвигающим покрытием, входящих в состав поляризационного интерферометра, и его анализ в дальней зоне. Как предполагалось ранее, при правильном расположении КУО создается оптический вихрь [1].

Ключевые слова: Оптический вихрь, Угловые отражатели, Поляризация света, Поляризационный интерферометр, Дальняя зона.

Цитирование: Венедиктов, В. Ю. Интерференционные методы формирования структурированного света / В. Ю. Венедиктов, Б. А. Евтушенко, А. А. Рыжая, А. А. Севрюгин, А. Л. Соколов, Е. В. Шалымов, Е. К. Юрьева // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 31–34.

Введение

В настоящее время проявляется большой интерес к различным методам генерации оптических вихрей (ОВ).

Согласно [1] в случае, если на систему из двух ретрорефлекторов, или же кубических угловых отражателей (КУО) со специальным фазосдвигающим покрытием падает излучение с круговой поляризацией, на выходе, в дальней зоне, должен образоваться скалярный оптический вихрь с зарядом 2. Дифракция в дальней зоне напрямую зависит от размера, угла между поверхностями, покрытия ретрорефлектора, а так же от падающего излучения. Для получения более подробной информации о КУО и поляризационных эффектах можно обратиться к [2].

Однако большинство этих исследований были теоретическими, мы решили собрать экспериментальные схемы, позволяющие подтвердить теоретические предположения, указанные в [1,2].

Результаты экспериментальной части

В практической части рассматриваются экспериментальные установки, позволяющие сгенерировать оптический вихрь. На рис. 1 показаны результаты формирования скалярного вихря в ближней зоне. Несмотря на высокие аберрации, на этих изображениях можно увидеть

вилкообразные узоры, указывающие на то, что результирующий пучок действительно имеет фазовую структуру, подобную оптическому вихрю с топологическим зарядом 2.

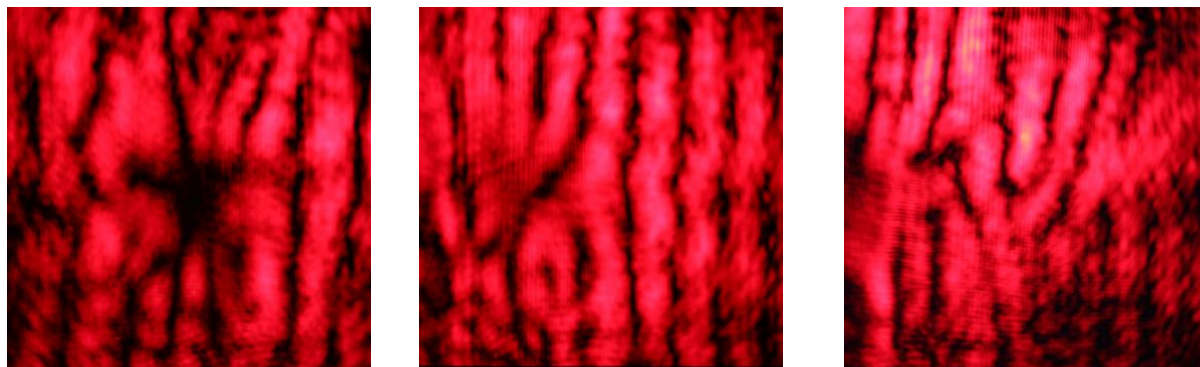


Рис. 1. Снимки, полученные с помощью интерферометра сдвига, с использованием луча с круговой поляризацией, отраженного от двух ретрорефлекторов

На рис. 2 и 3 представлены результаты исследования дифракционной картины дальнего поля как с линейной, так и с круговой поляризацией света. На рисунке 2 показаны результаты, полученные без поляризатора, с отчетливым распределением интенсивности в форме “пончика”, хотя и аберрированным. Добавление поляризатора привело к получению предсказанного в [1] рисунка из 4 точек, который вращался синхронно с ним. Однако на этот раз колебания фазы повлияли на нашу установку еще сильнее, ухудшив результирующие изображения, показанные на рисунке 3.

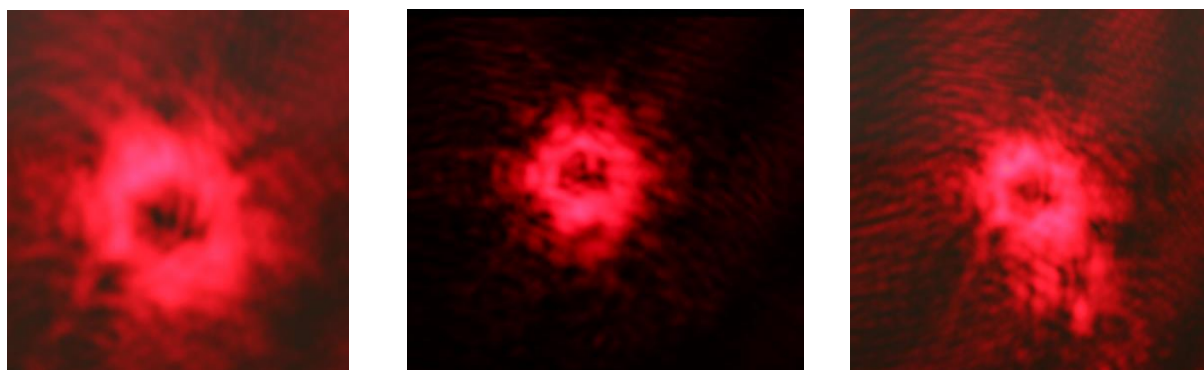


Рис. 2. Снимки, полученные без линейных поляризаторов

На рисунке 4 показаны результаты анализа фазовой структуры пучка в дальней зоне. Полученные результаты хоть и содержат в себе искомую “вилкообразную” интерференционную картину, не столь убедительны, так как интерферометр сдвига плохо подходит для измерения топологического заряда ОВ в дальней зоне. Тем не менее, на этих изображениях так же можно увидеть вилкообразный рисунок, указывающий на то, что результирующий пучок имеет фазовую структуру, подобную оптическому вихрю с топологическим зарядом 2.

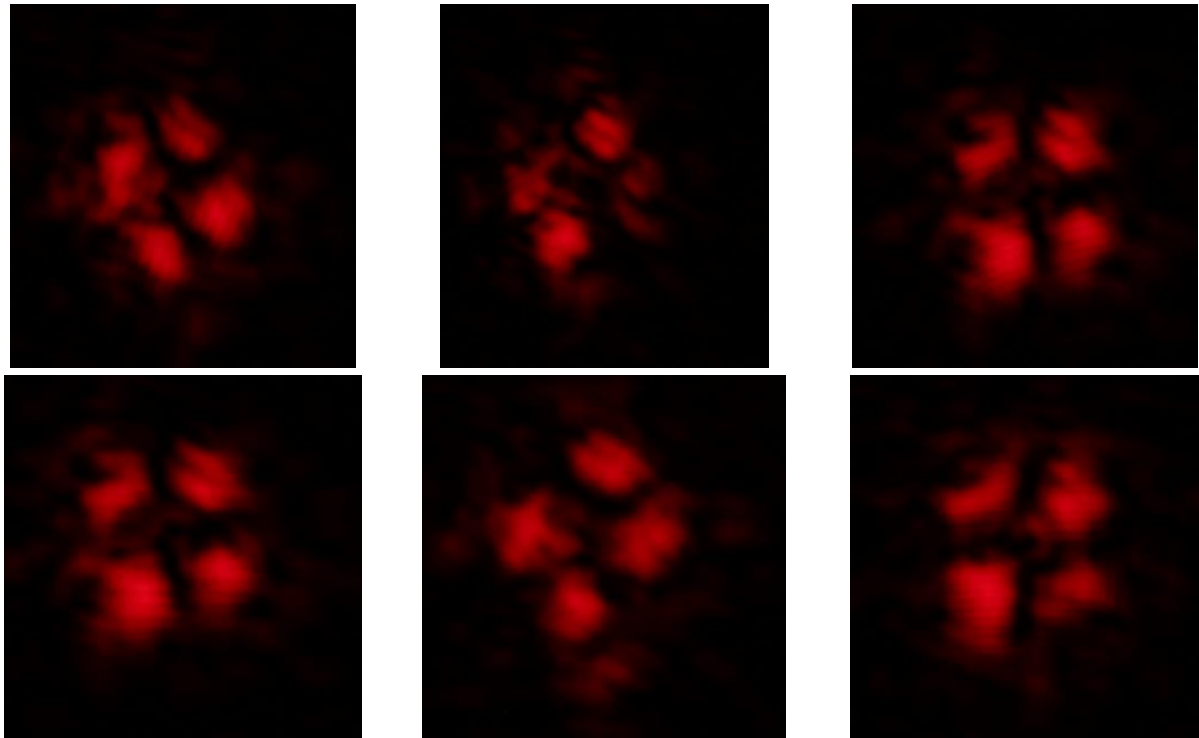


Рис. 3. Изображения, полученные при вращении линейного поляризатора на выходе системы уголковых кубических отражателей

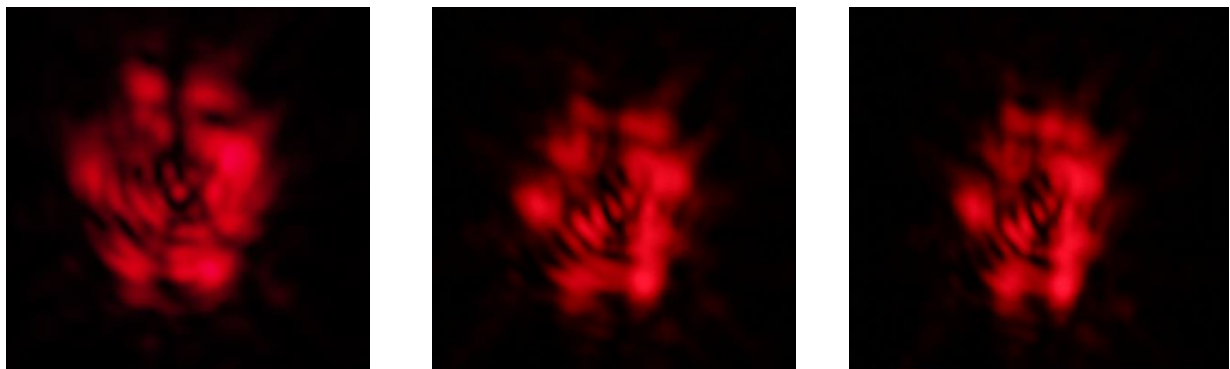


Рис. 4. Снимки, полученные в дальнем поле с помощью интерферометра сдвига

Заключение

В данной работе представлено экспериментальное исследование формирования поляризационно-симметричной структуры (оптического вихря), отраженного от системы двух уголковых отражателей со специальным фазосдвигающим покрытием. Основываясь на предыдущих теоретических исследованиях, создана схема, позволяющая проводить анализ оптического вихря в дальней зоне дифракции. Результаты показывают, что интерференция полученного изображения соответствует теоретическим исследованиям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1]. Sokolov A. L., Murashkin V. V. Retroreflective spatial-polarization interferometer // *Applied Optics*. – 2020. – Т. 59. – №. 32. – С. 9912-9923.
- [2]. Поляризациянная оптика. 3-е изд., испр. и доп. / Е. Ф. Ищенко, А. Л. Соколов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. – 576 с. – ISBN 978-5-9221-1838-5.
- [3]. Топологический заряд оптических вихрей / В.В. Котляр, А.А. Ковалев. Самара: Новая техника, 2021. – 185 с. – ISBN 978-5-88940-157-5.
- [4]. Соколов А. Л. и др. Угловые отражатели с интерференционным диэлектрическим покрытием // *Квантовая электроника*. – 2013. – Т. 43. – №. 9. – С. 795-799.

Interference methods for the structured light formation

*V. Y. Venediktov¹, B. A. Evtushenko¹, A. A. Ryzhaya¹, A. A. Sevryugin¹, A. L. Sokolov²,
E. V. Shalymov¹, E. K. Yuryeva¹*

¹ Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia

² Scientific and Production Corporation "Precision Instrument Engineering Systems", Moscow, Russia

The report is devoted to the experimental implementation of the polarization interferometer. Such an interferometer is an interferometer assembled according to the Michelson scheme using prismatic retroreflectors instead of flat mirrors. In the retroreflectors used, a special coating is applied to the reflecting faces, which (unlike similar devices using full internal reflection) does not lead to a mutual phase shift of the s- and p-polarized components of the incident radiation, which, in turn, allows controlling the mutual phase shift of interfering waves. It is shown experimentally that in such a system it is possible to form various non-trivial light beams with a singularity, and, in particular, scalar (phase) and vector optical vortices.

Keywords: Retroreflector. light polarization, Structured light.

Афокальный рефракционно-дифракционный корректор для расширения рабочих спектрального и температурного диапазонов тепловизионной оптики

Г. И. Грейсух¹, И. А. Левин², С. В. Казин¹

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

² ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева», Красногорск, Россия

В настоящем докладе представлена методика получения исходных параметров афокального корректора, который наряду с устранением терморасфокусировки позволяет расширить рабочий спектральный диапазон. Эффективность методики продемонстрирована на примере расчёта рефракционно-дифракционного афокального термокомпенсатора. Приведены оптические характеристики системы «афокальный корректор – объектив», рассчитанной на работу в среднем и длинноволновом диапазонах инфракрасного спектра в широком интервале рабочих температур.

Ключевые слова: Афокальный корректор, Атермализация, Продольный хроматизм, Тепловизионная система, Микроболометр.

Цитирование: Грейсух, Г. И. Афокальный рефракционно-дифракционный корректор для расширения рабочих спектрального и температурного диапазонов тепловизионной оптики / Г. И. Грейсух, И. А. Левин, С. В. Казин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 35–40.

Введение

Одной из основных целей модернизации оптико-электронных приборов является, как правило, расширение их функциональных возможностей. Известны методы воздействия на характеристики оптической системы с помощью афокального корректора [1, 2], которые дают возможность сохранить как оптическую часть, так и в большей степени механическую конструкцию модернизируемого объектива.

Применительно к тепловизионным системам афокальные корректоры могут быть использованы для достижения пассивной атермализации оптическим методом как альтернатива разработке механической конструкции термокомпенсатора. Однако большей функциональности модернизируемого объектива можно добиться, если совместить устранение терморасфокусировки с расширением рабочего спектрального диапазона, например, обеспечив функционирование оптической системы с неохлаждаемым микроболометром, чувствительным одновременно в среднем и длинноволновом инфракрасном (ИК) диапазоне.

В настоящем докладе представлена методика расчёта рефракционно-дифракционного афокального корректора терморасфокусировки, позволяющего расширить рабочий спектральный диапазон ИК-объектива при сохранении исходной оптической схемы и механической конструкции модернизируемой системы.

Методика расчёта афокального корректора

Известно, что с целью уменьшения порогового значения температурной чувствительности все тепловизионные системы, работающие с микроболометрами, проектируются как сверхсветосильные, а следовательно, апланатичные. Исходя из того, что оптическая сила афокального корректора на расчётной длине волны заданного спектрального диапазона и при номинальном значении термодинамической температуры t_1 должна быть равной нулю, а угловое увеличение – единице, условие пассивной оптической атермализации в сочетании с возможностью хроматической коррекции и сохранения апланатичности можно представить в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^J \varphi_j^{(t_1)} = 0 \\ s'_{F'(corrector+lens)}^{(t_2)} = s'_{F'(lens)}^{(t_1)} (1 + \alpha_{mount}(t_2 - t_1)) \\ \sum_{j=1}^J h_1^2 \frac{\varphi_j^{(t_1)}}{v_j} = -S_{Ich}^{(t_1)} \\ \Phi_{(corrector+lens)}^{(t_1)} = \frac{\sin u_{j+1}}{h_1} \end{array} \right. , \quad (1)$$

где h_1 – высота падения первого (апертурного) параксиального луча на первый оптический элемент афокального корректора; φ_j – оптическая сила j -го элемента афокального корректора; $s'_{F'(lens)}$, $s'_{F'(corrector+lens)}$ – задние фокальные отрезки объектива и системы «афокальный корректор – объектив»; α_{mount} – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала корпусных деталей объектива; v_j – коэффициент дисперсии j -го оптического элемента афокального корректора; S_{Ich} – первая хроматическая сумма объектива, вычисленная для заданного рабочего спектрального диапазона; $\Phi_{(corrector+lens)}$ и $\sin u_{j+1}$ – оптическая сила и числовая апертура системы «афокальный корректор – объектив» соответственно. Верхний индекс указывает на номинальную (t_1) или фактическую (t_2) термодинамическую температуру, при которой измерена или рассчитана характеристика. При этом все входящие в систему уравнений (1) оптические силы элементов и фокальные отрезки должны быть приведены на расчётной длине волны, а коэффициенты дисперсии вычислены для этой и крайних длин волн заданного рабочего спектрального диапазона.

Для выполнения условия атермализации требуется, чтобы оптическая сила афокального корректора в диапазоне температур ($t_2 - t_1$) изменилась на величину, равную

$$\Delta\varphi_{(corrector)} = \frac{s'_{F(lens)}^{(t_2)} - s'_{F(lens)}^{(t_1)} (1 + \alpha_{mount}(t_2 - t_1))}{b}, \quad (2)$$

$$b = \left[d - s'_{F(lens)}^{(t_1)} \left(1 + s_{F(lens)}^{(t_1)} \Phi_{(lens)}^{(t_1)} \right) \right] s'_{F(lens)}^{(t_2)} + \frac{1 + s_{F(lens)}^{(t_2)} s'_{F(lens)}^{(t_2)} \Phi_{(lens)}^{(t_2) 2}}{\Phi_{(lens)}^{(t_2) 2}} - s'_{F(lens)}^{(t_1)} [1 + \alpha_{mount}(t_2 - t_1)] \left[d - s'_{F(lens)}^{(t_1)} \left(1 + s_{F(lens)}^{(t_1)} \Phi_{(lens)}^{(t_1)} \right) + s_{F(lens)}^{(t_2)} \right], \quad (3)$$

где $s_{F(lens)}$ – передний фокальный отрезок объектива; $\Phi_{(lens)}$ – оптическая сила объектива; d – расстояние от афокального корректора до объектива, представленных в виде однокомпонентных систем их главными плоскостями в бесконечно тонком приближении.

С другой стороны, изменение оптической силы афокального корректора можно представить в виде

$$\Delta\varphi_{(corrector)} = \sum_{j=1}^J (\varphi_j^{(t_2)} - \varphi_j^{(t_1)}). \quad (4)$$

Получение исходных параметров афокального корректора для последующей оптимизации в составе с объективом включают следующие этапы:

1) Определение значений передних и задних фокальных отрезков, а также оптических сил объектива при температурах t_2 и t_1 исходя из известных конструктивных параметров оптической схемы.

2) Определение значения первой хроматической суммы объектива в заданном рабочем спектральном диапазоне исходя из известных конструктивных параметров оптической схемы.

3) Определение величины требуемого изменения заднего фокального отрезка системы «афокальный корректор — объектив» исходя из известных параметров механической конструкции объектива.

4) Выбор значения величины d исходя из габаритных возможностей размещения афокального корректора.

5) Вычисление оптических сил линз афокального корректора путём решения системы уравнений (1) с учётом выбора оптических материалов.

6) Оптимизация полученных параметров афокального корректора на основе расчета хода лучей через полную систему, включающую корректор и модернизируемый объектив.

Результаты

В качестве модернизируемого объектива выберем представленную в [3] оптическую схему (см. рис. 1) с фокусным расстоянием $f'=74,85$ мм, угловым полем зрения $2\omega=10,4^\circ$ и диафрагменным числом 1,25, рассчитанную на работу с микроболометром, чувствительным в спектральном диапазоне $\Delta\lambda=7-14$ мкм. Формат матричного фотоприёмника составляет 640×480 , а размер пикселя 17 мкм. С целью сохранения величины линейного поля зрения выберем двухдиапазонный микроболометр Bird 640 Ceramic Packaging BB Wide-Band [4], чувствительный в спектральном диапазоне $\Delta\lambda=3-14$ мкм, с аналогичными форматом и размером пикселя. Интервал рабочих температур ограничим значениями от -40°C до 60°C , а спектральный диапазон от $\lambda_{\min}=3,4$ мкм до $\lambda_{\max}=11,4$ мкм с внутренними границами поддиапазонов $\lambda_1=5,2$ мкм и $\lambda_2=7,5$ мкм соответственно.

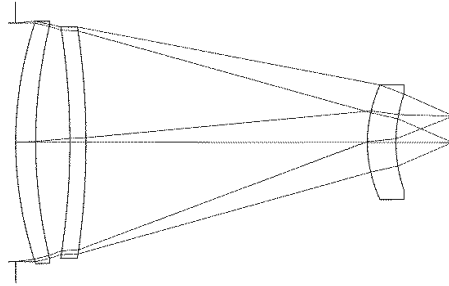


Рис. 1. Оптическая схема модернизируемого объектива

В результате решения системы уравнений (1) и с учётом подбора оптических материалов были получены следующие значения оптических сил линз афокального корректора: $\varphi_1=10,814$ дптр (материал — халькогенидное стекло марки HWS5), $\varphi_2=-10,976$ дптр (материал — монокристаллический германий), $\varphi_3=0,162$ дптр (дифракционный оптический элемент на подложке из монокристаллического германия).

Последующая оптимизация в программе оптического проектирования ZEMAX [5] конструктивных параметров афокального корректора при переходе к конечным толщинам элементов позволила получить оптическую схему, представленную на Рис. 2.

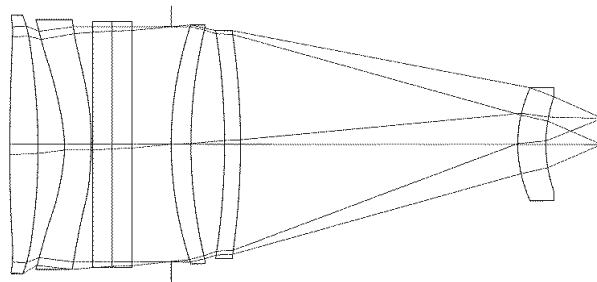


Рис. 2. Оптическая схема системы «афокальный корректор — объектив»

Для обеспечения дифракционной эффективности не ниже 85% во всем рабочем спектральном диапазоне и для всех углов поля зрения микроструктура дифракционного оптического элемента должна быть двухслойной (SrF_2/Ge) с двумя несовпадающими внутренними рельефами [6].

В таблице 1 приведено сравнение характеристик оптических схем исходного объектива и объектива с афокальным корректором.

Таблица 1. Оптические характеристики исходного объектива и объектива с афокальным корректором

Характеристика	Исходный объектив			Система «афокальный корректор – объектив»		
Угловое поле зрения	10,66°					
Фокусное расстояние	74,85 мм					
Диафрагменное число	1,25					
Рабочий спектральный диапазон	7–14 мкм			3,4–5,2 мкм 7,5–11,4 мкм		
Терморасфокусировка в интервале температур от –40°С до 60°С	0,838 мм			0,033 мм		
Разрешение по полю зрения при контрасте $T=0,2$	$t = -40^{\circ}\text{C}$	$t = 20^{\circ}\text{C}$	$t = 60^{\circ}\text{C}$	$t = -40^{\circ}\text{C}$	$t = 20^{\circ}\text{C}$	$t = 60^{\circ}\text{C}$
	2 мм ⁻¹	41 мм ⁻¹	3 мм ⁻¹	49 мм ⁻¹ 56 мм ⁻¹	45 мм ⁻¹ 57 мм ⁻¹	39 мм ⁻¹ 57 мм ⁻¹
Продольный хроматизм	47 мкм			87 мкм		
Модуль дисторсии по полю изображения	0,3%			0,2%		

Из данных таблицы 1 следует, что афокальный рефракционно-дифракционный корректор наряду с устранением терморасфокусировки позволил расширить рабочий спектральный диапазон. При этом увеличение значения остаточного хроматизма приходится на средневолновую ИК-область, что несколько снижает качество изображения, но не отражается на разрешающей способности тепловизионной системы, которая в данном случае остаётся ограничена размером пикселя выбранного двухдиапазонного приёмника излучения.

Заключение

Применение афокального корректора в виде отдельной сборочной единицы позволяет, с одной стороны, сохранить функциональность исходной оптической системы, а с другой – расширить возможности модернизируемого прибора. В случае ИК-объективов данный метод воздействия на оптические характеристики может быть использован для устранения терморасфокусировки, а также увеличения рабочего спектрального диапазона.

Предложенная методика расчёта афокального термокомпенсатора позволяет исходя из известных значений фокальных отрезков, оптической силы и первой хроматической суммы ИК-объектива определить оптические силы и материалы линз корректора, который в заданных спектральном и температурном диапазонах обеспечивает требование соблюдения условия апланатичности, устранение продольного хроматизма и необходимое изменение заднего фокального отрезка системы «афокальный корректор – объектив».

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Русинов М. М. Композиция оптических систем // Л.: Машиностроение, 1989; 383 с.
- [2] Слюсарев Г. Г. Методы расчёта оптических систем // Л.: Машиностроение, 1969; 672 с.
- [3] Медведев А. В., Гринкевич А. В., Князева С. Н. Атермализация объективов прицельно-наблюдательных комплексов как средство обеспечения жизнедеятельности объектов БТВТ // Фотоника; 2016; Том 56; № 2: с. 94-109.
- [4] SemiConductor Devices [Электронный ресурс]. URL: https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/Bird640-17-ceramic_brochure_v3_PRINT.pdf
- [5] Zemax [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zemax.com/pages/opticstudio/>
- [6] Greisukh G. I., Levin I. A., Ezhov E. G. Design of Ultra-High-Aperture Dual-Range Athermal Infrared Objectives // Photonics. – MDPI, 2022. – Т. 9. – №. 10. – С. 742.

Afocal refractive-diffractive corrector for expanding the working spectral and temperature ranges of thermal imaging optics

G. I. Greisukh¹, I. A. Levin², S. V. Kazin¹

¹ Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

² PJSC «Krasnogorsky Zavod», Krasnogorsk, Russia

We present a technique of calculation of the initial design parameters for designing afocal corrector. The afocal corrector eliminates thermal defocusing and expands the working spectral range. The efficiency of the proposed technique are demonstrated using example of the design of the refractive-diffractive afocal corrector, and the obtained optical performance is discussed.

Keywords: Afocal corrector, Athermalization, Longitudinal chromatism, Thermal imaging system, Microbolometer.

Точность восстановления волнового фронта при дифракции на паттерне, сформированном структурированным светом

С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Обсуждаются вопросы точности воспроизведения волнового фронта при рассеянии света на паттерне, образованном с помощью структурированного света, латерально освещающего 3D-объект. Сравниваются результаты дифракции, полученные таким способом с изображением исходного 3D-объекта. В приближении скалярной теории дифракции показаны результаты численных экспериментов по дифракции света на разных вариантах таких паттернов. Обсуждается степень схожести восстановленных 3D изображений и возможные причины их отличий.

Ключевые слова: Голография, Передача информации, Дополненная реальность, Голографическое TV, Структурированный свет.

Цитирование: Шойдин, С. А. Точность восстановления волнового фронта при дифракции на паттерне, сформированном структурированным светом / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 41–51.

Введение

Как было показано в [1–3] для передачи голографического 3D видео по стандартному радиоканалу необходимо сжатие голографической информации на 5–6 порядков, что не удаётся реализовать традиционными методами энтропийного сжатия [4, 5]. Как показано в [6], в голограмме существуют два типа гармоник пространственной голографической решётки. Один из них носит служебную функцию высоких несущих частот и отвечает за разделение восстановленных голограммой порядков дифракции, отделяя в пространстве восстановленное 3D изображение объекта от пучка нулевого порядка дифракции. Второй тип гармоник порождается девиацией первых при интерференции объектного и опорного пучков во время записи голограммы. Именно этот тип гармоник порождает пространственную структуру голограммы, несущую информацию о голографируемом объекте. Он должен быть передан на приёмный конец канала связи для последующего синтеза там компьютерной голограммы. В [7] приведены результаты экспериментов по передаче голографического 3D видео по стандартному радиоканалу на основе использования одного из способов передачи без несущей. Он заключается в передаче двух основных модальностей 3D изображения – карты высот и текстуры поверхности. Было показано, что такой метод работает лучше, чем пространственно-частотная селекция спектра и с его помощью удалось передавать 3D голографические сюжеты с TV частотой кадровой развёртки, высоким (Full HD) пространственным разрешением и непрерывным параллаксом каждого кадра, что, по признанию [5], и обеспечивает наилучший результат при передаче 3D видео. Причём, в [7] для создания карты высот была использована технология структурированного света. Создавалось

латеральное освещение 3D-объекта системой параллельных полос и фиксировались их искривления. В [8] эта технология была заменена на более простую – технологию, использующую сам паттерн структурированного света вместо голограммы. Однако вопросы точности восстановления волнового фронта, повторяющего 3D карту высот объекта, при дифракции на таком паттерне оставались не исследованы. Определению основных моментов, определяющих степень сходства 3D изображений, полученных в результате дифракции, согласованной по условиям Брэгга восстанавливающей волны на указанном паттерне и на классической компьютерной голограмме, синтезированной по виртуальному 3D-объекту, посвящена настоящая статья.

Метод

Ошибки воспроизведения объёма дифракционной структурой, представляющей собой фотофиксированный паттерн латерально падающих параллельных полос складываются из двух механизмов. Первый – это точность с которой мы регистрируем положение каждой точки этих полос при фотофиксации (рис. 1) и второй – это точность с которой восстанавливается волновой фронт при дифракции на этом паттерне (рис. 2, 3).

Как показано в [9], для простейшей схемы (рис. 1) точность регистрации положения точек паттерна определяется выражением (1):

$$z(x) = \frac{d_x}{2\pi \cdot \operatorname{tg}(\theta)} \psi(x), \quad (1)$$

где $z(x)$ – величина смещения вдоль оптической оси точки на карте высот 3D-объекта, d_x – период проецируемой на 3D-объект структуры параллельных полос, θ – угол между направлением проекции и направлением оптической оси регистратора, $\psi(x)$ – фазовый сдвиг, связанный с периодом интерференционной картины (2).

$$\psi(x) = 2\pi u(x)/d_x. \quad (2)$$

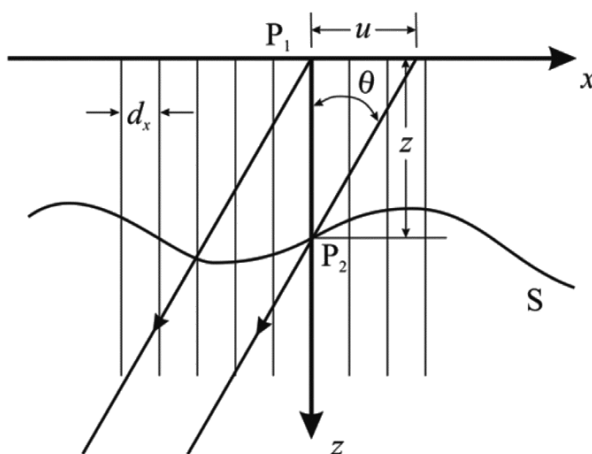


Рис. 1. Геометрия проекции паттерна полос на произвольную поверхность относительно базовой плоскости x , u – смещение точки полосы по оси x

Следовательно, ошибка глубины карты высот 3D-объекта Δz будет определяться выражением (3):

$$\Delta z(x) = \frac{d_x}{2\pi \cdot \text{tg}(\theta)} \Delta\psi(x). \quad (3)$$

Полученный описанным выше способом паттерн для реального 3D-объекта показан на рис. 2. Здесь величина смещения полос определялась по смещению её границы.

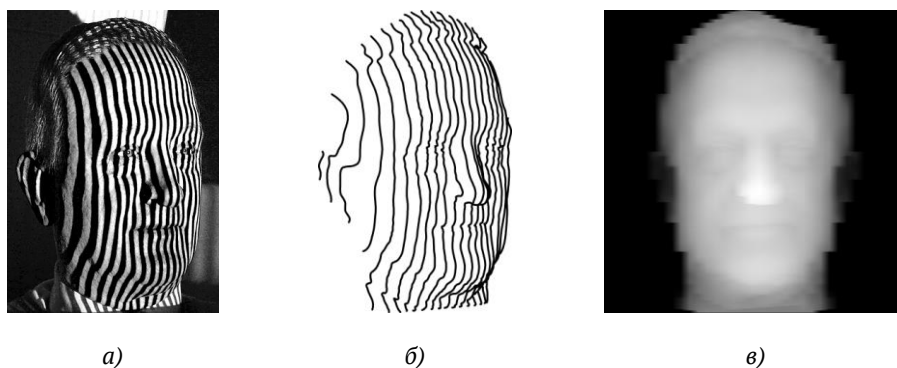


Рис. 2. Структура, сформированная латерально освещающей 3D-объект, системой параллельных полос, именуемая паттерном, сформированным из параллельных полос (ПСП): а) исходное изображение; б) выделенные границы полос; в) карта высот, построенная согласно (1), выраженная в градациях серого

Точнее смещение можно определять методом фазового сдвига Харихарана – Швайдера, описанным для разного количества фазовых сдвигов в [10–12], но в нашем случае полученной точности было достаточно. В эксперименте угол θ был около 9° , $d_x = 1$ см и $\Delta\psi$ не превышала $2\pi/10$. Значит Δz при глубине полупрофиля $z \approx 15$ см, была не больше, чем 9 мм или $9/150 \approx 6\%$:

$$\Delta z(x) \leq 9 \text{ мм} . \quad (4)$$

Причём ошибка по глубине изображения не возникала резко, а изменялась от края к краю изображения плавно, где-то достигая своего максимума и затем снова плавно спадая.

Другим источником искажений 3D изображения при дифракции на паттерне структурированных полос (ПСП) является дифракционное размытие, определяемое (рис. 3) величиной относительного отверстия $\omega = L_x/z_{\text{восст.}}$.

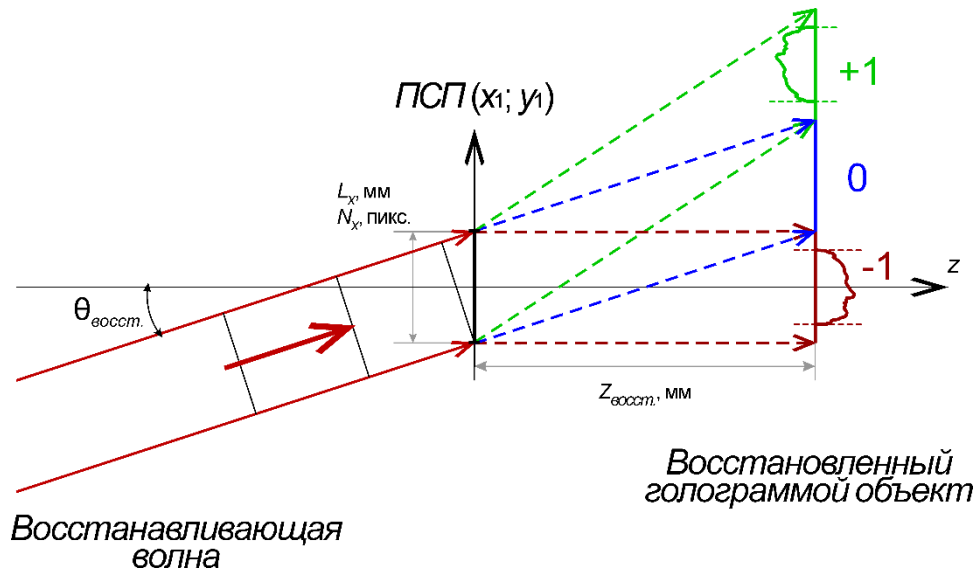


Рис. 3. Восстановление в схеме Лейта – Упатниекса 3D изображения на расстоянии $z_{восст.}$ от ПСП(x_1, y_1), состоящего из M вертикальных (по оси x_1) полос, размером L_x с числом пикселей N_x вдоль x_1

Диаметр пятна Эйри, в плоскости восстановления изображения при этом, равен $1,22 \cdot \lambda / \omega$. Для голограмм сфокусированных изображений можно считать глубину изображения равной расстоянию $z_{восст.}$ и $z_{восст.} = L_x$, т. е. $\omega \approx 1$ и диаметр пятна Эйри порядка λ .

Если по [8] отождествлять дифракционную структуру на рис. 2 с голографической дифракционной структурой, то условия Брэгга для неё будут выполняться только на длине волны, сравнимой с её поперечным периодом. Исходно (рис. 2а), он равен $1/20$ размера изображения. Здесь следует отметить, что наши качественные оценки, сделанные только для понимания происходящих процессов дифракции, далее будут опираться на приближение, в котором горизонтальные сечения полученных 20 полос рассматриваются как синусоиды (ниже, в разделе «численное моделирование» мы покажем и более точные результаты дифракции на ПСП из рис. 2б).

Очевидно, что построение карты высот на рис. 2в происходит с точностью до девиации каждой из 20 полос. Все изменения поверхности, не попавшие на эти полосы, будут пропущены. Если частота полос такова, что захватывает все изменения глубины 3D-объекта, то можно утверждать, что карта глубин будет передана на хорошем уровне, а значит, выбирая частоту большего порядка, можно рассчитывать на то, что между соседними полосами ПСП перепад высоты будет происходить плавно. В этом случае, согласно [8], для перевода условий Брэгга в видимый диапазон длин волн необходимо увеличить пространственную частоту ПСП, ожидая, что такая структура, в основном, сохранит девиацию, а значит и дифракция света на ней восстановит исходное 3D изображение. Какова же точность восстановления девиации, а с ней и волнового фронта дифрагировавшей на ПСП волны? Очевидно, что эта точность ограничена сверху ограничениями, задающимися дифракцией на исходном объекте (ПСП), которые в угловой мере можно определить как угол дифракционной расходимости на той длине волны, на которой была создана структура ПСП, если бы она создавалась как

голограмма, интерференцией объектного и опорного пучков. В этом случае ПСП с периодом τ_1 будет иметь один кружок Эйри, с $\tau_2 = \tau_1/2$ – в два раза меньше, а с $\tau_3 = \tau_1/3$, соответственно – в три. При этом точность восстановления волнового фронта будет определяться точностью восстановления углового спектра θ , восстанавливаемого ПСП (рис. 4).

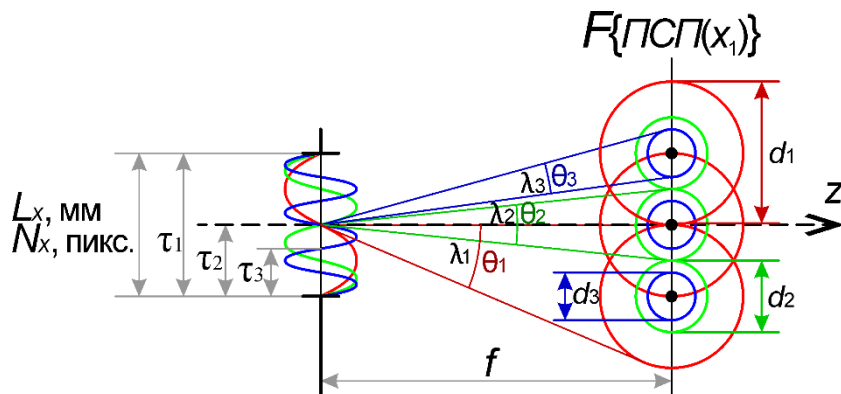


Рис. 4. Модель дифракции на паттерне структурированного света из трёх синусоидальных гармоник. L_x и N_x – размер ПСП в мм и в пикселях соответственно, τ_1, τ_2, τ_3 – периоды структуры ПСП, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и d_1, d_2, d_3 – угловой и линейный размеры дифракционного пятна Эйри образованные дифракцией света на ПСП излучением с длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, таких, что $\tau_1/\lambda_1 = \tau_2/\lambda_2 = \tau_3/\lambda_3 \approx 1$

В свою очередь, восстановление в пределах углового спектра, будет определяться длиной волны λ_i , когда изменения наклона опорной сферы эквивалентной оптической системы ПСП находятся внутри угла θ_i , определяемого угловым размером дифракции, примерно равным отношению диаметра пятна Эйри d_i к расстоянию до восстановленного изображения f (5). Поскольку с увеличением длины волны λ_i размер пятна Эйри, определяемый дифракцией на одном и том же отверстии L_x , будет увеличиваться пропорционально этой λ_i , а структура ПСП имеет период τ_i , характерный для дифракционной решётки (или голограммы) с длиной волны λ_i , то и точность восстановления волнового фронта θ_i в (5) будет ограничена отношением периода структуры ПСП τ_i к её размеру L_x :

$$\theta_i \approx d_i/f \approx \frac{\lambda_i}{L_x} \approx \frac{\tau_i}{L_x}. \quad (5)$$

Отсюда следует довольно простой и даже очевидный вывод, что точность восстановления волнового фронта ПСП будет не хуже размера длины волны, соответствующей по условиям Брэгга самой структуре ПСП. Так, для изображения рис. 2а,б, это примерно 1 см на базе, равной ширине объекта, это около 20 см или 5 % (6):

$$\Delta z(x)/f \leq \frac{d_x}{L_x} \approx 5\%, \quad (6)$$

$$\Delta z(x) \leq \frac{d_x}{L_x} f = 0,05, f \approx 7 \text{ мм}. \quad (7)$$

Полученное значение близко к точности, определяемой допусками на определение карты высот методом структурированного света по ошибкам смещения положения паттерна (рис. 2б) при его фиксации (4).

Сама структура паттерна на рис. 2б даже внешне очень похожа на голографическую дифракционную решётку, но с периодом τ около сантиметра ($1/20$ размера объекта). Условия Брэгга для такой решётки должны выполняться для излучения, находящегося в радиодиапазоне длин волн $\lambda \sim \tau$. Именно этот факт привёл к мысли о возможности смещения условий Брэгга к видимому диапазону спектра путём увеличения частоты решётки простым медианным мультиплицированием, не изменяя существующей в ПСП девиации пространственной частоты, определяемой 3D картой высот. Такое мультиплицирование было выполнено выделением необходимого числа градаций яркости карты высот рис. 2в так, чтобы Брэгговская дифракция разводила нулевой и минус первый порядок дифракции на угол около $\theta \approx 9^\circ$. Этого было достаточно, чтобы недалеко от голограммы порядки разделялись полностью (рис. 3), а период решётки на ПСП, в плоскости (x_1, y_1) , как на голограмме, аналогично [8], состоял из трёх пикселей, что обеспечивало выполнение требований теоремы отсчётов Котельникова [13].

Таким образом, видно, что увеличение частоты пространственных гармоник, формирующих ПСП, приводит к увеличению точности представления восстановленного ПСП волнового фронта. Так, все пространственные гармоники, формирующие карту высот, разделятся на две группы. В первую войдут гармоники, которые имеют период больше периода полос ПСП, они будут переданы структурой ПСП, а вторые, имеющие меньший период – не будут. Напомним, что для восстановления 3D изображения в видимом диапазоне длин волн, требуется выполнение условий Брэгга. На основании того, что в [3, 6] было установлено, что классическая голограмма имеет две группы пространственных гармоник, одна из которых несёт служебную функцию и служит как несущая группа частот для разделения порядков дифракции при восстановлении, а другая отражает их девиацию (рис. 2) и формирует изображение 3D-объекта. Было сделано предположение о том, что в ПСП пространственные гармоники тоже отражают девиацию, неся в нём информацию об изображении 3D-объекта. Осталось для выполнения условий Брэгга в видимом диапазоне электромагнитного спектра соответствующим образом увеличить несущие частоты. Это было сделано способом с аппроксимацией положения мультиплицированных полос, основывающейся на интерполяции с учётом изменения расстояний в соседних полосах ПСП.

Численное моделирование

Аналогично [8], для удобства вычислений, как и при записи-восстановлении голограммы, при синтезе паттерна из параллельных полос мы сжимали глубину записываемого 3D изображения до $\lambda/2$, чтобы при вычислениях интегральных преобразований Фурье и Френеля, показывающих восстановленное 3D изображение, можно было использовать быстрые алгоритмы FFT и D-FFT без дополнительных алгоритмов развёртывания фазы. А

после указанных вычислений глубина 3D изображений восстанавливалась до прежнего размера.

Таким образом, были построены изображения, полученные дифракцией на ПСП (рис. 5) для разного количества полос паттерна, аппроксимацией с учётом изменения расстояния между полосами по двум соседним (Bilinear) [14].

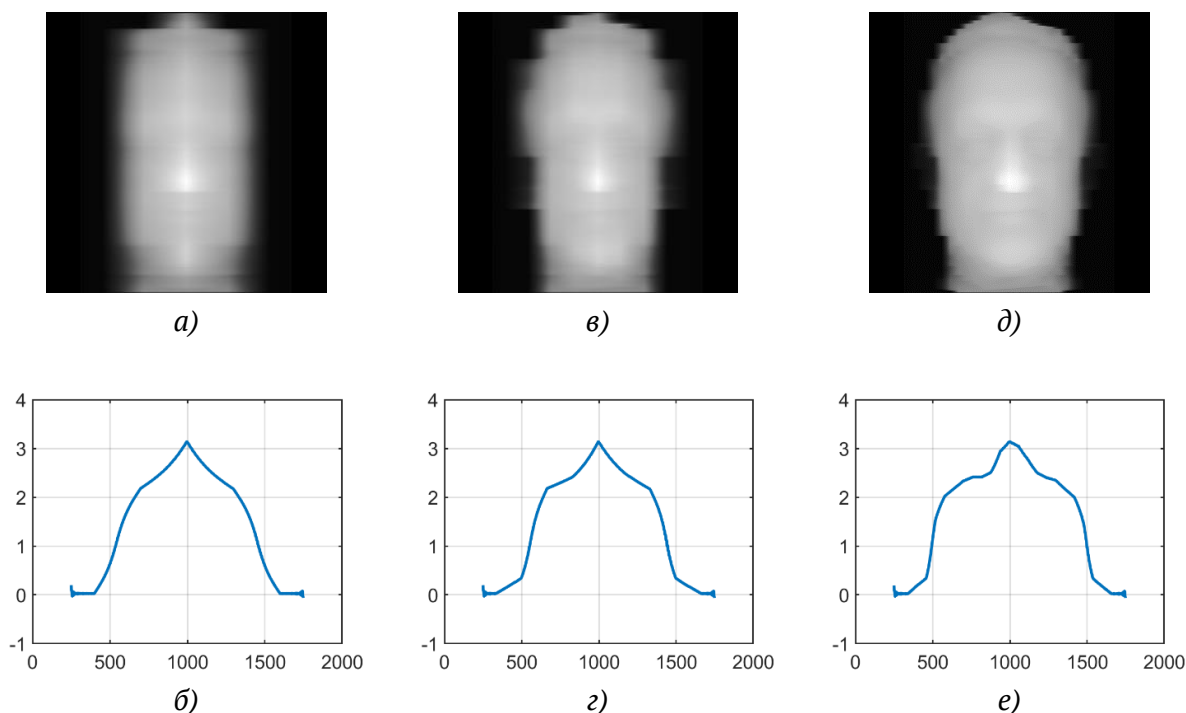


Рис. 5. Мультипликация ПСП, полученных соответствующими сечениями карты высот на рис. 2в: а) из $M = 5$ полос и б) её горизонтальное сечение по 1200 строке; в) из $M = 9$ полос и г) её горизонтальное сечение по 1200 строке; д) из $M = 25$ полос и е) её горизонтальное сечение по 1200 строке

На рис. 6 показаны 3D изображения, исходное (а) и восстановленные (б, в, г) по картам высот из рис. 5.

Из рис. 6 видно, что 5 полос совершенно недостаточно для передачи 3D изображения человека, а 9 полос – уже на грани адекватного восприятия. При этом, с одной стороны, человек уже узнаваем, но с другой стороны, присутствует эффект так называемой «зловещей долины» [15–16], а именно заметны неточности передачи деталей поверхности, как, например, в районе правой щеки или в районе левой части носа.

Более подробно это можно увидеть на увеличенных фрагментах этих изображений (рис. 7а–в). Лучше всего выглядит изображение рис. 6г, где отличия от исходного объекта (рис. 6а) практически незаметны. Откуда можно сделать вывод, что в карте высот исходного объекта есть гармоники с периодом выше $1/9$ и практически нет гармоник с периодом меньше, чем в $1/25$ от его размера. А более мелкие детали 3D изображения мы воспринимаем через перепады яркости на текстуре, не воспринимая их глубины.

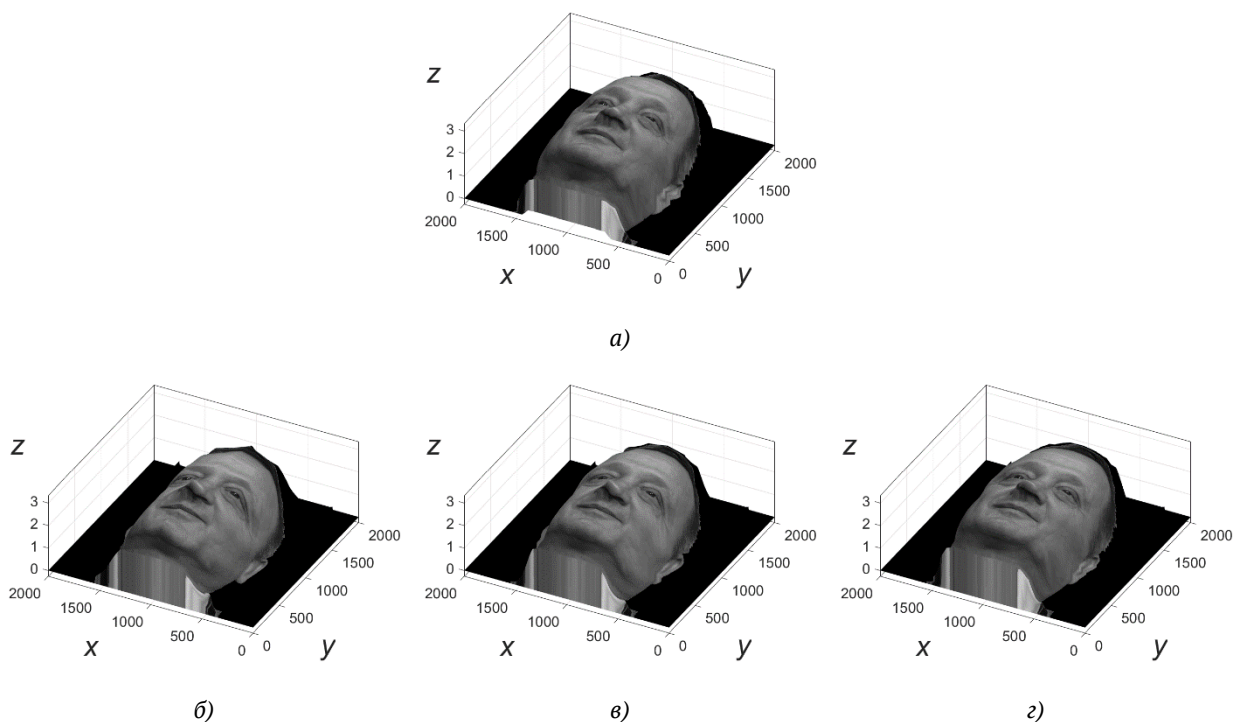


Рис. 6. Восстановленные 3D изображения, полученные дифракцией на ПСП для трёх случаев с 5, 9 и 25 полосами + интерполяция Bilinear:
 а) исходное 3D изображение; б) дифракция на паттерне из 5 полос;
 в) дифракция на паттерне из 9 полос; г) дифракция на паттерне из 25 полос

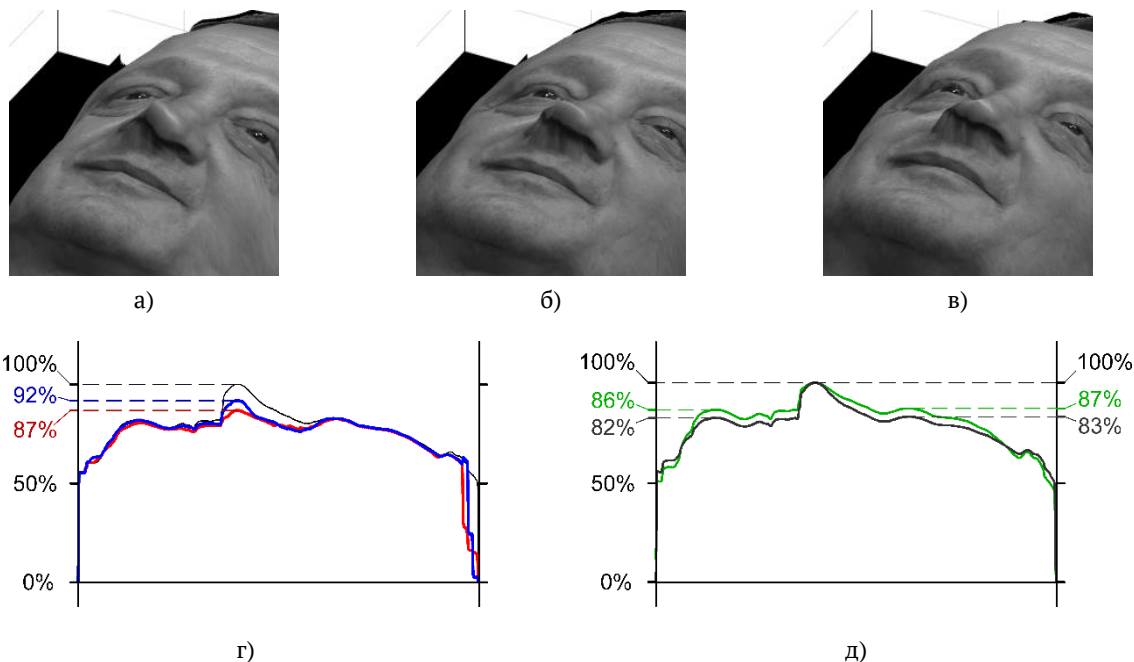


Рис. 7. Увеличенные фрагменты изображений при дифракции: а) на паттерне из 9 полос (рис. 6в); б) на паттерне из 25 полос (рис. 6г); в) исходное 3D изображение (рис. 6а); г) разница между а) и б) по 900 столбцу, где чёрным – столбец № 1000 с максимальной высотой, красным и синим – столбцы № 900 из а) и б) соответственно и д) разница между исходным изображением (рис. 6а) и восстановленным дифракцией на паттерне из 25 полос (рис. 6г)

Видно, что дифракция на паттерне из 9 полос в 900 столбце в районе носа (нумерация столбцов по рис. 6) имеет локальный провал по сравнению с дифракцией на 25 полосах. Его величина составляет примерно 5 % от глубины объекта, т. е. примерно 7 мм. Кроме того, само изображение, восстановленное дифракцией на паттерне из 25 полос, и исходное изображение в отдельных точках тоже отличаются на 4 %. Это свидетельствует о правильности оценок, проведённых выше.

Обсуждение и основные выводы

В работе приведены оценки точности восстановления волнового фронта, восстановленного при дифракции на паттерне структурированных полос (ПСП) опорной волны, согласованной с этим ПСП по условиям Брэгга. Показано, что неточность восстановления карты высот 3D-объекта определяется двумя основными эффектами. Первый из них – точность определения глубины методом структурированного света, лежащего в основе предложенного ранее метода дифракции на ПСП. Второй – точность восстановления волнового фронта дифракционными структурами с периодом τ_i .

Паттерн структурированных полос с периодом τ , при дифракции на нём света, при восстановлении 3D изображения объекта работает как фильтр пространственных гармоник, отрезая компоненты спектра с периодом меньше τ .

Полученные значения ошибок, при вычислении карты высот методом структурированного света (6 %) из (4) по ошибкам фиксации положения паттерна (рис. 2б) и значения ошибок, полученные по оценкам дифракционного размытия пятна Эйри (5 %) от ПСП из (6), оказались близки по своей величине. Полученные в численном эксперименте с реальным 3D изображением (рис. 7) отклонения при недостаточном количестве полос ПСП, также показали возможность возникновения ошибок того же порядка (5 %). При увеличении числа полос на ПСП до 25 (рис. 6г), величина ошибки, исследованной на рис. 7 снижается. Сама точность восстановления 3D карты высот, судя по результатам рис. 7г, тоже восстанавливается с точностью до 4 %.

Используемый метод представления 3D-объекта, заключающийся в первоначальном его сжатии до глубины меньше λ , последующих операций, в том числе и интегральных преобразований Фурье или Френеля, с последующим возвращением объекту его прежней глубины не только позволяет с достаточной точностью восстанавливать карту высот, но и модулировать искусственно введённую несущую частоту, тем самым восстанавливая и амплитуду и фазу 3D-объекта, получая изображение с заданной глубиной цвета.

Полученные результаты указывают на перспективность предложенного в [3, 6] и развитого в [8] метода восстановления 3D изображений дифракцией на структуре, полученной медианным мультиплицированием полос, восстанавливающей как амплитуду, так и фазу зарегистрированного 3D-объекта, аналогичного методу классической голографии.

Список источников

- [1] **Шойдин, С. А.** Способ дистанционного формирования голографической записи / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Автометрия. – 2021. – Т. 57. – № 1. – С. 92–102.
<https://doi.org/10.15372/AUT20210110>.
- [2] **Shoydin, S. A.** Transmission of 3D Holographic Information via Conventional Communication Channels and the Possibility of Multiplexing in the Implementation of 3D Hyperspectral Images / S. A. Shoydin, A. L. Pazoev // Photonics. – 2021. – Vol. 8. – № 10. – P. 448–473.
<https://doi.org/10.3390/photonics8100448>.
- [3] **Шойдин, С. А.** Сжатие 3D голографической информации аналогично передаче информации на одной боковой полосе / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев – Текст: непосредственный // Оптический журнал. – 2022. – Т. 89. – № 3. – С. 79–88. – <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-03-79-88>.
- [4] **Lucente, M.** Computational holographic bandwidth compression / M. Lucente // IBM Systems Journal. – 1996. – Vol. 35. – № 3.4. – P. 349–365. <https://doi.org/10.1147/sj.353.0349>.
- [5] **Blinder, D.** Signal processing challenges for digital holographic video display systems / D. Blinder, A. Ahar, S. Bettens, T. Birnbaum, A. Symeonidou, H. Ottevaere, C. Schretter, P. Schelkens // Signal Processing: Image Communication. – 2019. – Vol. 70. – P. 114–130.
<https://doi.org/10.1016/j.image.2018.09.014>.
- [6] **Shoydin, S. A.** Recording a Hologram Transmitted over a Communication Channel on One Sideband / S. A. Shoydin, S. B. Odinkov, A. L. Pazoev, I. K. Tsyganov, E. A. Drozdova // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – № 23. – P. 11468. <https://doi.org/10.3390/app112311468>.
- [7] Шойдин С. А. Передача 3D голографической информации по радиоканалу / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, Национальный исследовательский университет ИТМО. – 2023. – Т. 23. – № 1. – С. 21–27.
<https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-1-21-27>.
- [8] **Shoydin, S. A.** Structured Light Patterns Work Like a Hologram Shoydin S. A., Pazoev A. L. // Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 4037. – <https://doi.org/10.3390/app13064037>.
- [9] **Múnera, N.** Evaluation of fringe projection and laser scanning for 3D reconstruction of dental pieces / N. Múnera, L. Gabriel, J. Garcia-Sucerquia // Dyna (Medellin, Colombia). – 2012. – Vol. 79. – № 171. – P. 65–73. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532012000100008 (дата обращения: 20.06.2023).
- [10] **Schwider, J.** Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources / J. Schwider, R. Burow, K.-E. Elssner, J. Grzanna, R. Spolaczyk, K. Merkel // Applied Optics. – 1983. – Vol. 22. – № 21. – P. 3421–3432. <https://doi.org/10.1364/AO.22.003421>.
- [11] **Creath, K. V.** Phase-Measurement Interferometry Techniques / K. Creath, E. Wolf // Progress in Optics. – 1988. – Vol. 26. – P. 349–393. [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70178-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70178-1).
- [12] **Birch, D. J. S.** Optical shop testing, 2nd edn, Wiley, New York, 1992, ISBN 0-471-52232-5 / D. J. S. Birch, D. Malacara (Ed.) // Advanced Materials for Optics and Electronics. – 1993. – Vol. 2. – № 4. – P. 205.
<https://doi.org/10.1002/amo.860020408>.
- [13] **Котельников, В. А.** О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи – Всесоюзный энергетический комитет // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933. Репринт статьи в журнале УФН. – Т. 176. – № 7. – 2006. – С. 762–770.
- [14] **Fadnavis, S.** Image Interpolation Techniques in Digital Image Processing: An Overview / S. Fadnavis // International Journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – Vol. 4. – № 10 (Part 1). – P. 70–73. https://ijera.com/papers/Vol4_issue10/Part%20-%201/K41007073.pdf (дата обращения: 20.06.2023).

- [15] **Mori, M.** The Uncanny Valley [From the Field] / M. Mori, K. F. MacDorman, N. Kageki // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2012. – Vol. 19. – № 2. – P. 98–100.
<https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>.
- [16] **Шойдин, С. А.** Эффект «зловещей долины» при передаче голографических изображений (на англ.) / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 3. – С. 4–9. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-3-4-9>.

Accuracy of wavefront reconstruction during diffraction on a pattern formed by structured light

S. A. Shoydin, A. L. Pazoev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

The issues of the accuracy of reproduction of the wavefront during light scattering on a pattern formed by structured light laterally illuminating a 3D-object are discussed. The diffraction results obtained in this way are compared with the image of the original 3D-object. In the approximation of the scalar diffraction theory, the results of numerical experiments on light diffraction on different variants of such patterns are shown. The degree of similarity of the reconstructed 3D images and possible reasons for their differences are discussed.

Keywords: Holography, Information transmission, 3D augmented reality, Holographic TV, Structured light.

Исследование поляризационной зависимости пропускания бесщелевого спектрографа

Д. М. Ахметов^{1,2}, А. Н. Мельников², Э. Р. Муслимов¹, Д. Ю. Харитонов^{1,2}, Э. Г. Ибатуллин¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева
— КАИ, Казань, Россия

² АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики»,
Казань, Россия

Состояние поляризации излучения несет важную информацию о его источнике. Например, в астрономии поляриметрические и спектрополяриметрические измерения являются практически единственным способом исследования магнитных полей звезд и потому имеют большое значение для звездной астрофизики. При проведении подобных измерений важно обеспечить точную калибровку используемого оптико-электронного прибора и определить инструментальные поляризационные эффекты. Значительная часть астрономических спектральных приборов строится на базе объемно-фазовых голограммных дифракционных решеток. Они отличаются высокой максимальной дифракционной эффективностью, низким уровнем рассеяния света, возможностью коррекции аберраций и задания геометрии с нулевым отклонением пучка. С другой стороны, известно, что дифракционная эффективность таких решеток может сильно зависеть от состояния поляризации излучения, особенно при повышении пространственной частоты. Этот эффект должен быть точно охарактеризован для фотометрической калибровки астрономического спектрографа или реализации в нем спектрополяриметрического режима. В настоящей работе мы демонстрируем измерение поляризационной зависимости коэффициента пропускания на примере бесщелевого спектрографа с гризмой. Гризма работает в сходящемся пучке $f/6,8$ в спектральном диапазоне 450–950 нм и обеспечивает формирование спектра на приемнике $36,8 \times 36,8 \text{ мм}^2$ (4096×4096 пикселей) с расчетной спектральной разрешающей способностью до R1067.

Ключевые слова: Поляризация, Голограммная дифракционная решетка, Композитный голограммный элемент, Дифракционная эффективность.

Цитирование: Ахметов, Д. М. Исследование поляризационной зависимости пропускания бесщелевого спектрографа / Д. М. Ахметов, А. Н. Мельников, Э. Р. Муслимов, Д. Ю. Харитонов, Э. Г. Ибатуллин // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 52–58.

Введение

Поляризация излучения космических источников дает информацию об их физических характеристиках: величине и геометрии магнитных полей, химическом составе, форме, размерах, концентрации и ориентации рассеивающих излучение частиц, степени однородности поверхностной яркости астрономического объекта. Поляризация может возникать или в самом источнике, или (и) в среде между источником и наблюдателем. В случае точечных источников поляризация излучения может оказаться единственным поставщиком информации о внутренней (пространственно неразрешенной) структуре объекта. Исследование поляризации является важнейшим тестом для определения

механизма генерации излучения в космических условиях: рассеяние на мелких частицах (от электронов до пылинок), синхротронное излучение релятивистских электронов в магнитных полях.

Магнитные поля управляют движением вещества в Галактике. Величина космических магнитных полей изменяется в широких пределах: от 10^{-6} Гс в межзвездной среде до 10^{12} Гс и более в магнитосферах пульсаров. Магнитные поля в межгалактической среде напряженностью 10^{-9} Гс влияют на поведение вещества вблизи галактик не меньше, чем поля нейтронных звезд напряженностью 10^{12} Гс на движение окружающей плазмы.

При измерениях круговой и линейной поляризации в спектрах звезд могут быть обнаружены разнообразные проявления магнитных полей, присутствующих в среде, где формируются основные свойства регистрируемого излучения, т.е. в звездной атмосфере и околосредной оболочке. Из вышесказанного следует, что аппаратура, ориентированная на исследования поляризации астрофизических объектов, должна обладать широким диапазоном чувствительности и спектрального разрешения.

Например, во многих исследовательских программах на телескопах Специальной Астрофизической Обсерватории РАН важное место занимают поляриметрические и спектрополяриметрические наблюдения. По мере смены поколений светоприемников совершенствуется и техника анализа поляризационных свойств излучения. Разработка эффективных спектрографов позволяет предусмотреть новые варианты спектрополяриметрических наблюдений. Именно таким путем идет разработка приборов и методов спектрополяриметрии во всем мире [1].

В настоящей работе мы исследуем поляризационную зависимость коэффициента пропускания, разрабатываемого примере бесщелевого спектрографа с композитной призмой. Задачами исследования является теоретическая оценка инструментальной поляризации, вносимой подобным элементом, и разработка экспериментального способа ее проверки.

Описание оптической схемы спектрографа

Рассматривается оптическая схема бесщелевого спектрографа, представленного на Рисунке 1, основанного на использовании призмы - склейки объемно-фазовой пропускающей решетки и призмы [2], которая используется в сходящемся пучке $f/6,8$ в спектральном диапазоне 450–950 нм и обеспечивает формирование спектра на приемнике $36,8 \times 36,8$ мм².

Спектрограф используется совместно с телескопом, построенным по схеме Далла-Киркхэма, и состоящим из первичного зеркала 1 диаметром 500мм, вторичного зеркала 2 и линзового корректора 3. Как показывают расчеты, абберации и неравномерность пропускания в такой схеме телескопа достаточно малы и дальнейшем не рассматриваются. Дифракционная решетка 5 устанавливается в сходящемся пучке и работает с широким полем зрения. Призма 6 изготавливается из оптического стекла ТФ8, обладающего большим показателем преломления и сравнительно малой дисперсией.

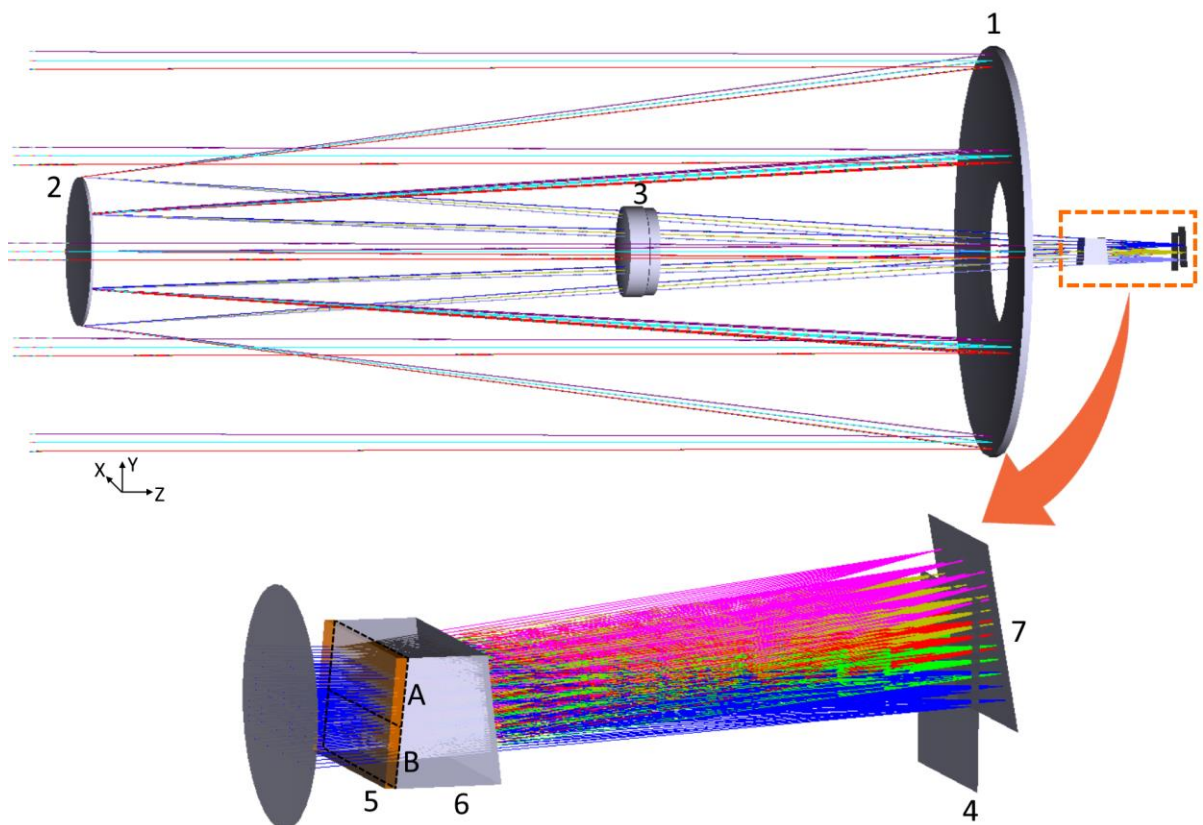


Рис.1. Общий вид оптической схемы бесщелевого спектрографа, соединенного с телескопом Далла-Киркхэма : 1 – основное зеркало, 2 – вторичное зеркало, 3 – линзовый корректор, 4 - положение фокальной плоскости в режиме отображения, 5 – составная голографическая решетка, разбитая на две зоны А и Б, 6 – призма, 7 – положение плоскости спектрального изображения.

Она служит для уменьшения угла отклонения рабочих пучков и при этом мало влияет на дисперсию и aberrации. Изображение спектра 7 регистрируется номинальной камерой телескопа SBIG STX-1680, установленной в смещенном положении. При расчетах положение компонентов определяются относительно номинальной плоскости изображения телескопа 4. Подробнее схема спектрографа описана в [3].

Дифракционная решетка 5 представляет собой объемно-фазовую голограмму и разбивается на две зоны, для которых независимо изменяются aberrации записывающих волновых фронтов и время экспозиции, определяющее глубину модуляции показателя преломления. Такой элемент называется композитным и позволяет внести дополнительную коррекцию aberrаций, а также скомпенсировать неравномерность дифракционной эффективности по полю зрения и апертуре.

Моделирование поляризационных характеристик

Известно, что объемно-фазовые голограммные решетки могут обладать высокой максимальной дифракционной эффективностью (ДЭ), широкими возможностями по коррекции aberrаций и характеризуются отсутствием паразитных изображений и низким уровнем рассеянного света. При этом среди их недостатков, наряду с выраженной

спектральной и угловой селективностью, можно указать заметную поляризационную зависимость дифракционной эффективности [4].

Для оценки дифракционной эффективности такой решетки можно использовать теорию связанных волн Когельника [5]. На Рисунке 2 показаны спектральные зависимости ДЭ для неполяризованного излучения, ТЕ и ТМ поляризации, вычисленные с помощью данной скалярной теории.

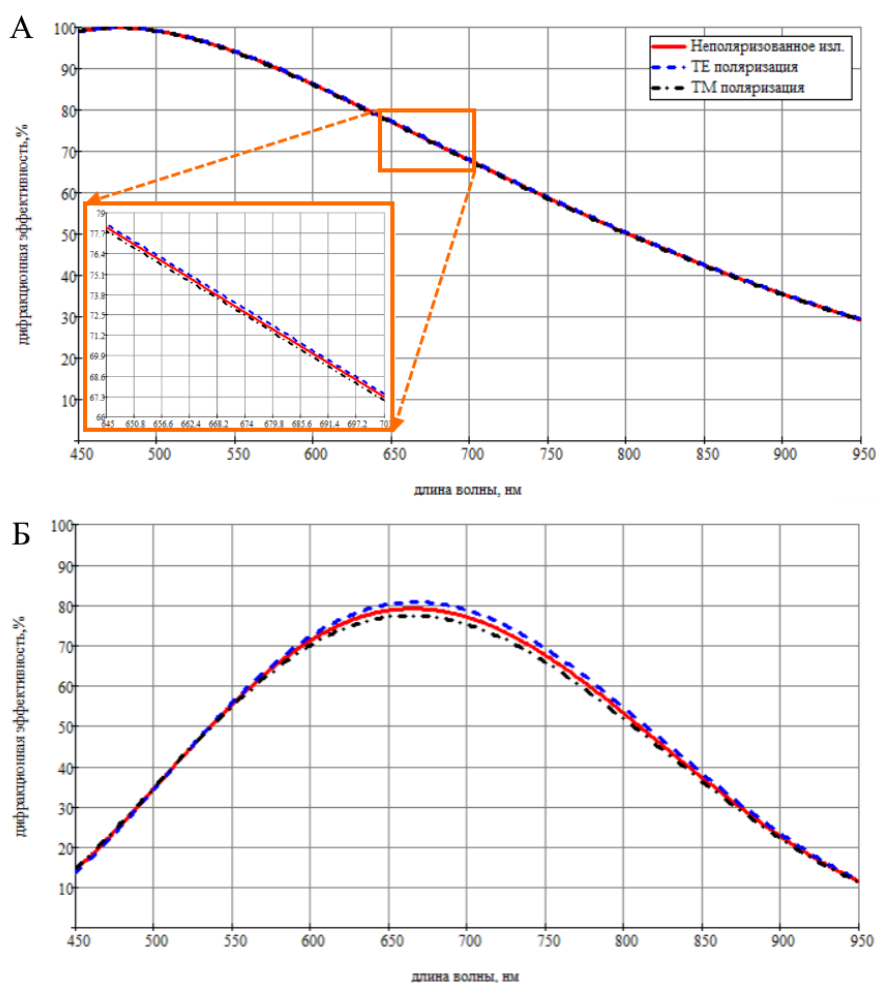


Рис. 2. Спектральная зависимость ДЭ, вычисленная в рамках скалярной теории дифракции: А – для решетки с пространственной частотой 327 мм⁻¹, Б – для решетки с пространственной частотой 600 мм⁻¹.

Используются данные, принятые в [3] в качестве исходных для оптимизации структуры голограммы: рассматривается центр поля зрения и середины зрачка, глубина модуляции составляет 0,012, толщина структуры 20 мкм. На Рисунке 2, А приведены кривые, полученные для номинальной пространственной частоты решетки 327 мм⁻¹. Видно, что разность ДЭ для двух состояний поляризации не превосходит 0,4%. Для сравнения на Рисунке 2, Б дана аналогичная кривая для случая пространственной частоты 600 мм⁻¹. В этом случае разность ДЭ становится заметной и достигает 3,4%.

Однако в рассматриваемой схеме условия работы голограммы значительно варьируются по полю зрения и апертуре. В данном случае результаты расчета по соотношениям теории связанных волн могут быть неточны, в первую очередь из-за эффекта конической дифракции. Соответственно, используется точный численный метод строгого анализа связанных волн (RCWA), реализованный в программе *reticolo* [6]. В данном случае используются точные данные трассировки лучей в схемах записи и работы гризмы. Для параметров структуры голограммы использованы оптимизированные значения из [3]: толщина структуры 20 мкм для всей решетки, глубина модуляции 0,019 в зоне А и 0,022 в зоне В (см. Рис.1).

Результаты расчета пространственного распределения ДЭ на трех контрольных длинах волн показаны на диаграммах на Рисунке 3. Значения представляют собой разность между ДЭ, вычисленной для ТЕ и ТМ поляризации. Изменение ДЭ по полю зрения значительно меньше изменения по апертуре, поскольку падающий пучок близок к телецентрическому. По этой причине на диаграммах представлены данные только для центра поля зрения.

Максимальное значение разности ДЭ составляет 0,89; 1,07 и 0,73% для длин волн 450,700 и 950 нм, соответственно.

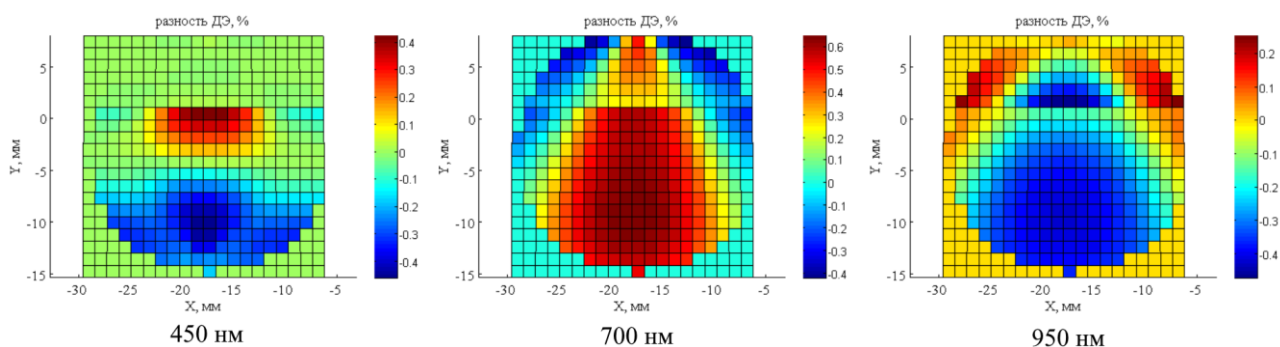


Рис.3. Пространственное распределение разности ДЭ для ТЕ и ТМ поляризации.

Полученные значения превосходят первоначальную оценку, полученную по аналитическим формулам. Однако абсолютные значения остаются достаточно малыми и поляризационная зависимость ДЭ не должна оказывать влияния на результаты наблюдений и измерений.

Установка для измерения поляризации и алгоритм проведения эксперимента и

Схема установки для экспериментального определения фотометрических характеристик гризмы, включая поляризационную зависимость ДЭ показана на Рисунке 4. Алгоритм измерений состоит из следующих этапов:

1. Устанавливается источник широкополосного спектра 1, монохроматор 2 и приемник излучения 6 (например, фотодиод BPW34). Щель монохроматора ограничивается по высоте до 1-2 мм.

2. Пара объективов 4 Индустар-51 ($f'=210\text{мм}$, 1:4.5) юстируется при линейном увеличении $-1\times$ и относительном отверстии выходного пучка 1:7. Для ограничения поперечного сечения

светового пучка и достижения требуемой апертуры между двумя объективами устанавливается ирисовая диафрагма.

3. Проводится несколько измерений освещенности в плоскости изображения с использованием набора нейтральных фильтров. По отсчетам, снимаемым с выхода микроконтроллера 7, строится калибровочная таблица.

4. В плоскости 3 устанавливается поляризатор. Измерения по п. 3 повторяются для двух положений с разворотом плоскости поляризации на 90° .

5. Проводится серия измерений по спектру для 6-7 длин волн, покрывающих диапазон 450-950 нм.

6. В сходящийся пучок на расстоянии 160 мм перед изображением устанавливается призма 5. Измерения пп.4-5 повторяются.

7. Определяется разность измеренных значений для двух состояний поляризации с учетом статистики измерений.

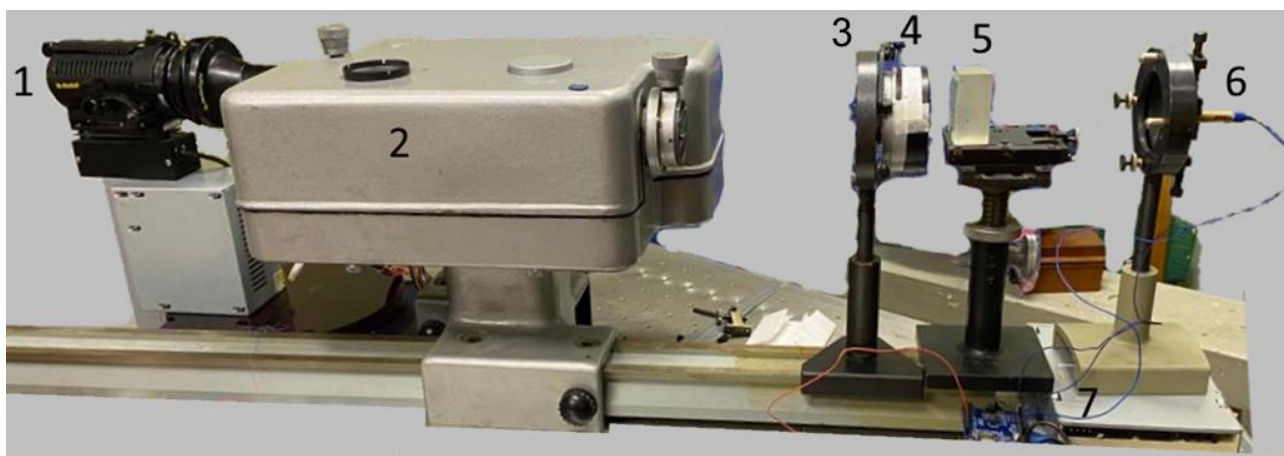


Рис. 4. Схема экспериментальной установки.

Заключение

В настоящей работе рассмотрена поляризационная зависимость коэффициента пропускания композитной призмы, работающей в схеме бесщелевого спектрографа. С помощью моделирования показано, что поляризационная зависимость дифракционной эффективности объемно-фазовой голограммной решетки, определяющей коэффициент пропускания, несколько увеличивается при введении в модель изменения углов падения в схеме работы и записи. Однако даже при этом максимальное изменение ДЭ в зависимости от состояния поляризации составляет около 1%. Такое изменение не должно оказывать влияния на фотометрические характеристики прибора, а в перспективе низкая инструментальная поляризация делает возможным использование подобных компонентов для спектрополяриметрических измерений в научных исследованиях. Для экспериментального исследования поляризационной зависимости коэффициента пропускания призмы разработана и собрана лабораторная установка.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-79-00082.

Список источников

- [1] Клочкова В. Г. и др. Поляриметрия и спектрополяриметрия звезд. Приборы и методы // Астрофизический бюллетень. – 2005. – №. 58. – С. 132-144.
- [2] Diffraction gratings handbook /C. Palmer, E. Loewen. – Rochester: Newport corporation, 2014. – 271 p.
- [3] Muslimov E. et al. Optical Design of a Slitless Astronomical Spectrograph with a Composite Holographic Grism //Photonics. – MDPI, 2023. – Т. 10. – №. 4. – С. 385.
- [4] Handbook of optical holography / H. J. Caulfield. – NY:Academic Press, 1979—654 p.
- [5] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // Bell System Technical Journal. – 1969. – Т. 48. – №. 9. – С. 2909-2947.
- [6] Chateau N., Hugonin J. P. Algorithm for the rigorous coupled-wave analysis of grating diffraction // JOSA A. – 1994. – Т. 11. – №. 4. – С. 1321-1331.

Investigation of the transmission polarization dependence of a slitless spectrograph

D. Akhmetov^{1, 2}, A. N. Melnikov², E. Muslimov¹, D. Kharitonov^{1, 2}, E. G. Ibatullin¹, E. R. Muslimov¹

¹ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

² JSC «Scientific-Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

The radiation polarization state brings important information about its source. For example, in astronomy, polarimetric and spectropolarimetric measurements are practically the only way to study the magnetic fields of stars and, therefore, are of great importance for stellar astrophysics. When carrying out such measurements, it is important to ensure accurate calibration of the optical and electronic instrument and to determine the instrumental polarization effects. A significant part of astronomical spectral instruments is built on the basis of volume-phase holographic diffraction gratings. They are notable for the high peak diffraction efficiency, low scattered light, a possibility to introduce an aberration correction and zero-deviation geometry. On the other hand, it is known that the diffraction efficiency of such gratings depends strongly on the radiation polarization state, especially with increasing of the spatial frequency. This effect must be accurately characterized for the photometric calibration of an astronomical spectrograph or for the implementation of spectropolarimetric mode in it. In this paper, we demonstrate the measurement of the transmission polarization dependence on the example of a slitless spectrograph with a grism. The grism operates in a converging $f/6,8$ beam in the spectral range of 450–950 nm and forms a spectral image on a $36,8 \times 36,8$ mm² detector (4096×4096 pixels) with a computed spectral resolving power up to R1067.

Keywords: Polarization, Holographic diffraction grating, Composite holographic element, Diffraction efficiency.

Оптическое дифференцирование второго порядка трехмерного светового пучка с использованием слоистой металлодиэлектрической структуры

Л. Л. Досколович^{1,2}, А. И. Кашапов^{1,2}, Е. А. Безус^{1,2}, Н. В. Головастиков^{1,2}, Д. А. Быков^{1,2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Исследуется оптическая реализация операции дифференцирования второго порядка с помощью слоистой металлодиэлектрической структуры в геометрии наклонного падения. Показано, что преобразование профиля трехмерного светового пучка, происходящее при его отражении от слоистой структуры, может быть описано в рамках теории линейных систем. Получена передаточная функция данной линейной системы и показано, что если слоистая структура обладает нулем отражения второго порядка по пространственной частоте для одной из поляризаций, то реализуемое ей преобразование соответствует взвешенной сумме вторых производных по пространственным координатам от профиля падающего пучка. С использованием представленного теоретического описания рассчитана слоистая металлодиэлектрическая структура для вычисления оператора Лапласа от профиля трехмерного линейно-поляризованного светового пучка. Представленные результаты численного моделирования демонстрируют вычисление указанного оператора с высоким качеством.

Ключевые слова: Оптическое дифференцирование, Вторая производная, Оператор Лапласа, Слоистая структура, Передаточная функция.

Цитирование: Досколович, Л. Л. Оптическое дифференцирование второго порядка трехмерного светового пучка с использованием слоистой металлодиэлектрической структуры / Л. Л. Досколович, А. И. Кашапов, Е. А. Безус, Н. В. Головастиков, Д. А. Быков // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 59–68.

Введение

В последние годы наблюдается большой интерес к разработке структур нанофотоники для оптической обработки информации и аналоговых оптических вычислений. Указанные структуры рассматриваются в качестве перспективной элементной базы, призванной обеспечить дальнейшее развитие вычислительных систем [1, 2]. Одними из наиболее важных операций аналоговых оптических вычислений являются операции дифференцирования оптического сигнала во времени и по пространственной координате. Для оптической реализации данных операций были предложены различные резонансные структуры фотоники, в частности, резонансные дифракционные решетки [2–6] и слоистые структуры [7–9]. Использование для дифференцирования именно резонансных структур связано с тем, что получение требуемого для дифференцирования нуля в спектре дифракционной структуры, обусловлено, как правило, резонансными эффектами возбуждения её собственных мод.

Несмотря на большое количество работ по оптическому дифференцированию, существует всего несколько работ, посвященных оптическому дифференцированию второго порядка [11–14]. Под дифференцированием второго порядка мы будем понимать дифференциальный оператор, соответствующий взвешенной сумме вторых производных по пространственным координатам. Важным частным случаем данного оператора является оператор Лапласа. Оптическая реализация данного оператора представляет большой интерес для различных задач обработки изображений, а также для аналогового решения уравнений математической физики.

Для оптической реализации оператора дифференцирования второго порядка требуются дифракционные структуры, имеющие нули второго порядка по пространственным частотам (тангенциальным компонентам волнового вектора) в спектре отражения или пропускания. Наиболее просто выполнение данного условия достигается в геометрии нормального падения, для которой нули второго порядка обеспечиваются симметрией задачи дифракции [11]. В частности, такой подход использовался в работах [2, 11–14] для оптической реализации операции дифференцирования второго порядка с помощью слоистых дифракционных структур (в отражении) [11, 12] и с помощью дифракционных решеток (ДР) с двумерной периодичностью (в пропускании) [2, 13, 14]. С одной стороны, слоистые структуры существенно проще ДР с точки зрения их технологической реализации. С другой стороны, недостатком таких структур является тот факт, что они работают в режиме отражения при нормальном падении. Это усложняет применение таких слоистых структур в практических задачах и требует использования в оптической схеме дополнительных оптических элементов.

В настоящей работе для оптической реализации операции дифференцирования второго порядка предлагается слоистая металлодиэлектрическая структура, состоящая из двух трехслойных структур «металл-диэлектрик-металл». Предлагаемая структура реализует данную операцию в отражении, но, в отличие от ранее рассмотренных слоистых структур [11, 12], работает в геометрии наклонного падения, и, таким образом, не требует дополнительных оптических элементов при практической реализации. В работе получена ПФ, описывающая преобразование профиля трехмерного светового пучка, происходящее при его отражении от слоистой структуры при наклонном падении. На основе рассмотренного теоретического описания рассчитана слоистая структура для вычисления оператора Лапласа. Представленные результаты численного моделирования рассчитанной структуры подтверждают корректность предложенного теоретического описания и демонстрируют вычисление оператора Лапласа с высоким качеством.

1. Описание дифракции трехмерного пучка на слоистой структуре при наклонном падении

Рассмотрим световой пучок, падающий на слоистую структуру под углом θ (рис. 1). Для описания дифракции пучка на слоистой структуре будет удобно задать падающий пучок в

локальной системе координат $\mathbf{r}_{\text{inc}} = (x_{\text{inc}}, y_{\text{inc}}, z_{\text{inc}})$, связанной с падающим пучком и повернутой на угол θ относительно оси y глобальной системы координат $\mathbf{r} = (x, y, z)$ (рис. 1). Для представления падающего пучка будем использовать базис плоских волн, имеющих в глобальной системе координат ТМ- и ТЕ-поляризацию (от англ. transverse magnetic и transverse electric) [15]. У ТМ-волн вектор магнитного поля перпендикулярен плоскости падения, содержащей волновой вектор и ось z , а вектор электрического поля лежит в данной плоскости. У ТЕ-волн вектор электрического поля перпендикулярен плоскости падения, а вектор магнитного поля лежит в данной плоскости.

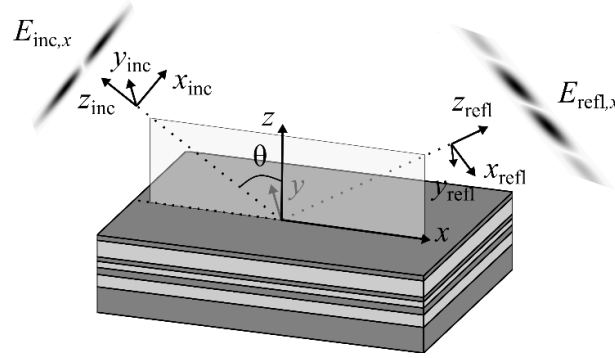


Рис. 1. Геометрия задачи дифракции трехмерного пучка на слоистой структуре

Представим падающий пучок в системе координат $\mathbf{r}_{\text{inc}} = (x_{\text{inc}}, y_{\text{inc}}, z_{\text{inc}})$, в виде векторной суперпозиции плоских волн различных направлений (с различными тангенциальными компонентами волновых векторов $\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}} = (k_{x,\text{inc}}, k_{y,\text{inc}})$ с ТМ- и ТЕ-поляризацией:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\text{inc}}(\mathbf{r}_{\text{inc}}) &= [\mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}_{\text{inc}}), \mathbf{H}_{\text{inc}}(\mathbf{r}_{\text{inc}})]^T = \\ &= \iint G_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) \Phi_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) \exp\left(i\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}\mathbf{r}_{\perp,\text{inc}} - iz_{\text{inc}}\sqrt{k_0^2\epsilon_{\text{sup}} - k_{\perp,\text{inc}}^2}\right) d\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}} + \\ &+ \iint G_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}, \omega) \Phi_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) \exp\left(i\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}\mathbf{r}_{\perp,\text{inc}} - iz_{\text{inc}}\sqrt{k_0^2\epsilon_{\text{sup}} - k_{\perp,\text{inc}}^2}\right) d\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{r}_{\perp,\text{inc}} = (x_{\text{inc}}, y_{\text{inc}})$, $\mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}_{\text{inc}})$, $\mathbf{H}_{\text{inc}}(\mathbf{r}_{\text{inc}})$ — векторы электрического и магнитного поля падающего пучка, $\Phi_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})$, $\Phi_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})$ — векторы из компонент электрического и магнитного поля плоских волн, имеющих ТМ и ТЕ-поляризацию в глобальной системе координат, $G_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})$ и $G_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})$ — спектры ТЕ- и ТМ-компонент падающего пучка, представляющие амплитуды ТЕ- и ТМ-волн, образующих пучок, $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны, ϵ_{sup} — диэлектрическая проницаемость среды. Выражения для векторов $\Phi_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})$, $\Phi_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})$ в (1) несложно получить из уравнений Максвелла в виде [15]:

$$\Phi_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) = [\mathbf{E}_{\text{TM,inc}}, \mathbf{H}_{\text{TM,inc}}]^T = \frac{1}{|\mathbf{k}_{\perp}|} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha} \\ \epsilon_{\text{sup}}\boldsymbol{\beta} \end{bmatrix}, \Phi_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) = [\mathbf{E}_{\text{TE,inc}}, \mathbf{H}_{\text{TE,inc}}]^T = \frac{1}{|\mathbf{k}_{\perp}|} \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\beta} \\ \boldsymbol{\alpha} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{где } |\mathbf{k}_{\perp}| = \sqrt{k_{y,\text{inc}}^2 + (k_{x,\text{inc}}^2 \cos^2 \theta - k_{z,\text{inc}}^2 \sin^2 \theta)^2}, k_{z,\text{inc}} = -\sqrt{k_0^2\epsilon_{\text{sup}} + \mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}^2},$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} -k_{x,\text{inc}}k_{z,\text{inc}} \cos \theta + (k_{y,\text{inc}}^2 + k_{z,\text{inc}}^2) \sin \theta \\ -k_{y,\text{inc}}(k_{z,\text{inc}} \cos \theta + k_{x,\text{inc}} \sin \theta) \\ (k_{y,\text{inc}}^2 + k_{z,\text{inc}}^2) \cos \theta - k_{x,\text{inc}}k_{z,\text{inc}} \sin \theta \end{bmatrix}, \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} -k_0k_{y,\text{inc}} \cos \theta \\ k_0(-k_{x,\text{inc}} \cos \theta + k_{z,\text{inc}} \sin \theta) \\ k_0k_{y,\text{inc}} \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

За счет выбора спектров $G_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})$ и $G_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})$ можно задать две требуемые компоненты электромагнитного поля. Предположим, что в плоскости $z_{\text{inc}} = 0$ падающий пучок является линейно поляризованным по оси x_{inc} , так что $E_{\text{inc},y}(\mathbf{r}_{\perp,\text{inc}}, 0) \equiv 0$. Будем считать, что x -компонента электрического поля при $z_{\text{inc}} = 0$ является заданной и имеет вид

$$E_{\text{inc},x}(\mathbf{r}_{\perp,\text{inc}}, 0) = \iint G_x(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) \exp(i\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}\mathbf{r}_{\perp,\text{inc}}) d\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}, \quad (4)$$

Где $G_x(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})$ — спектр x -компоненты электрического поля. В этом случае спектры $G_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp})$, $G_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp})$ могут быть получены из (1)-(3) в виде [15]:

$$G_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) = g_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})G_x(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}), \quad G_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) = g_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})G_x(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}), \quad (5)$$

где

$$g_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) = \frac{k_{x,\text{inc}} \cos \theta - k_{z,\text{inc}} \sin \theta}{k_{z,\text{inc}} \sqrt{k_{y,\text{inc}}^2 + (k_{x,\text{inc}} \cos \theta - k_{z,\text{inc}} \sin \theta)^2}}, \quad (6)$$

$$g_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) = \frac{k_{y,\text{inc}}(k_{z,\text{inc}} \cos \theta + k_{x,\text{inc}} \sin \theta)}{k_0k_{z,\text{inc}} \sqrt{k_{y,\text{inc}}^2 + (k_{x,\text{inc}} \cos \theta - k_{z,\text{inc}} \sin \theta)^2}},$$

При выбранных спектрах (5) $E_{\text{inc},y}(\mathbf{r}_{\perp,\text{inc}}, 0) \equiv 0$ и x -компонента, задаваемая формулой (4), является основной компонентой электрического поля падающего пучка. Поэтому далее мы будем рассматривать преобразование только x -компоненты электрического поля, происходящее при отражении пучка от слоистой структуры.

При отражении падающего пучка от слоистой структуры амплитуды ТМ- и ТЕ-волн, составляющих пучок, умножаются на коэффициенты отражения $R_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp})$, $R_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp})$, где $\mathbf{k}_{\perp} = (k_x, k_y)$ — тангенциальные компоненты волнового вектора падающей плоской волны в глобальной системе координат

$$\mathbf{k}_{\perp} = \mathbf{k}_{\perp}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) = \left(k_{x,\text{inc}} \cos \theta + \sin \theta \sqrt{k_0^2 \varepsilon_{\text{sup}} - k_{x,\text{inc}}^2 - k_{y,\text{inc}}^2}, k_{y,\text{inc}} \right) \quad (7)$$

В системе координат отраженного пучка $\mathbf{r}_{\text{refl}} = (\mathbf{r}_{\perp,\text{refl}}, z_{\text{refl}})$, где $\mathbf{r}_{\perp,\text{refl}} = (x_{\text{refl}}, y_{\text{refl}})$, тангенциальные компоненты $\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}$ волновых векторов падающих волн не изменяются при отражении, а компонента $k_{z,\text{inc}}$ меняет знак, поскольку отраженный пучок распространяется по оси z_{refl} . Таким образом, с учетом (1), (5), x -компонента электрического поля отраженного пучка (в системе координат $\mathbf{r}_{\text{refl}} = (\mathbf{r}_{\perp,\text{refl}}, z_{\text{refl}})$) будет иметь вид

$$E_{\text{refl},x}(\mathbf{r}_{\text{refl}}) = \iint G_x(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) H(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) \exp(i\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}\mathbf{r}_{\perp,\text{refl}} + iz_{\text{refl}} \sqrt{k_0^2 \varepsilon_{\text{sup}} - k_{\perp,\text{inc}}^2}) d\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}} \quad (8)$$

где

$$H(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}}) = g_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})\Phi_{\text{TM},1}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})R_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})) + g_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})\Phi_{\text{TE},1}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})R_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})) \quad (9)$$

Здесь функции $g_{\text{TM}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})$, $g_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp,\text{inc}})$ заданы уравнением (6), а $\Phi_{\text{TM},1}$, $\Phi_{\text{TE},1}$ являются первыми компонентами векторов Φ_{TE} , Φ_{TM} в (2) при $k_{z,\text{inc}} = +\sqrt{k_0^2 \varepsilon_{\text{sup}} - k_{\perp,\text{inc}}^2}$.

Из формул (1), (8), (9) следует, что преобразование x -компоненты электрического поля падающего пучка $E_{inc,x}(\mathbf{r}_{\perp,inc}, 0) \rightarrow E_{refl,x}(\mathbf{r}_{\perp,refl}, 0)$, происходящее при его отражении, соответствует преобразованию «сигнала» $E_{inc,x}(\mathbf{r}_{\perp,inc}, 0)$ линейной системой с передаточной функцией (ПФ) $H(\mathbf{k}_{\perp,inc})$, заданной формулой (9).

2. Исследуемая металлодиэлектрическая слоистая структура с нулем отражения второго порядка

Рассмотренная выше модель дифракции будет далее использована для описания преобразования светового пучка, происходящего при отражении от слоистой металлодиэлектрической структуры, имеющей нуль отражения второго порядка и состоящей из двух последовательно расположенных трехслойных структур «металл-диэлектрик-металл» (МДМ).

Рассмотрим сначала одиночную структуру МДМ-структуру (рис. 2а), состоящую из верхнего металлического слоя (толщина $h_{m,1}$, диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{m,1}$), диэлектрического слоя (толщина h_d , диэлектрическая проницаемость ϵ_d) и нижнего металлического слоя (толщина $h_{m,2}$, диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{m,2}$). Диэлектрические проницаемости материалов над и под структурой равны ϵ_{sup} и ϵ_{sub} соответственно.

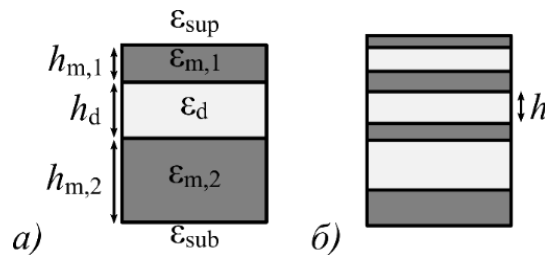


Рис. 2. Геометрия МДМ-структур: а) одиночной структуры и б) двойной структуры, состоящей из двух одиночных МДМ-структур, разделенных диэлектрическим слоем с толщиной h

Пусть на структуру наклонно падает плоская волна с некоторой поляризацией (ТМ- или ТЕ-) и тангенциальными компонентами волнового вектора $k_{x,0} = k_0 \sqrt{\epsilon_{sup}} \sin \theta$, $k_y = 0$, где θ — угол падения. Отметим, что рассматриваемая МДМ-структура является резонансной, поскольку в ней могут существовать вытекающие моды, локализованные в диэлектрическом слое. Благодаря формированию резонанса Фабри–Перо коэффициент отражения структуры может обращаться в нуль. Более того, в [8, 9] показано, что при заданных материалах (значениях $\epsilon_{m,1}$, $\epsilon_{m,2}$, ϵ_d), длине волны и угле падения (или тангенциальной компоненте волнового вектора $k_{x,0}$) в МДМ-структуре всегда можно получить нулевое отражение за счет выбора толщин $h_{m,1}$, $h_{m,2}$, h_d образующих её слоев.

Далее рассмотрим двойную МДМ-структуру (рис. 2б), состоящую из двух различных одиночных МДМ-структур, имеющих нули отражения при $k_x = k_{x,0}$ (при угле падения θ). В

этом случае коэффициенты отражения одиночных МДМ-структур, рассматриваемые как функции от k_x , имеют вид

$$R_i(k_x) = c_{i,1}(k_x - k_{x,0}) + O[(k_x - k_{x,0})^2], i = 1, 2. \quad (10)$$

В работе [9] с использованием формализма матрицы рассеяния показано, что в двойной МДМ-структуре можно получить нуль отражения 2-го порядка по k_x при $k_x = k_{x,0}$. При этом коэффициент отражения двойной МДМ-структуры принимает вид

$$R_{dbl}(k_x) = c_2(k_x - k_{x,0})^2 + O[(k_x - k_{x,0})^3]. \quad (11)$$

Выражение (11) описывает коэффициент отражения двойной МДМ-структуры в геометрии плоского падения (при $k_y = 0$). В общем случае $k_y \neq 0$ коэффициент отражения $R_{dbl}(k_x, k_y)$ можно представить виде [15]:

$$R_{dbl}(k_x, k_y) = c_2(k_x - k_{x,0})^2 + c_4 k_y^4 + O[(k_x - k_{x,0})^3 + k_y^6]. \quad (12)$$

Как отмечено выше, двойная МДМ-структура рассчитывается для конкретной поляризации. При этом для «кросс-поляризованной» падающей волны (например, ТЕ-поляризованной в случае МДМ-структуры, рассчитанной для ТМ-поляризации) коэффициент отражения не обращается в нуль при $\mathbf{k}_{\perp,inc} = (k_{x,0}, 0)$ и имеет вид [15]

$$R_{dbl}^{cr}(k_x, k_y) = R_{dbl}^{cr}(k_{x,0}, 0) + c_1^{cr}(k_x - k_{x,0}) + c_2^{cr} k_y^2 + O[(k_x - k_{x,0})^2 + k_y^4] \quad (13)$$

3. Передаточная функция двойной МДМ-структуры

ПФ, описывающая преобразование x -компоненты электрического поля падающего трехмерного пучка при отражении от слоистой структуры, имеет вид (9). Предположим, что в качестве слоистой структуры используется двойная МДМ-структура, имеющая нуль второго порядка при $k_x = k_{x,0} = k_0 \sqrt{\epsilon_{sup}} \sin \theta$ для ТМ-поляризации. В этом случае коэффициенты отражения $R_{TM}(\mathbf{k}_{\perp})$, $R_{TE}(\mathbf{k}_{\perp})$ в (9) будут иметь вид (12) и (13) соответственно. Раскладывая ПФ (9) в ряд Тейлора до квадратичных членов в окрестности точки $\mathbf{k}_{\perp,inc} = (0,0)$ и учитывая вид коэффициентов отражения (12), (13) для двойной МДМ-структуры, получим

$$H(\mathbf{k}_{\perp,inc}) \approx c_{x,2} k_{x,inc}^2 + c_{y,2} k_{y,inc}^2 \quad (14)$$

где

$$c_{x,2} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial k_{x,inc}^2} \left[R_{TM}(\mathbf{k}_{\perp}(\mathbf{k}_{\perp,inc})) \right] \Big|_{\mathbf{k}_{\perp,inc}=(0,0)}, c_{y,2} = \frac{2R_{TE}(k_{x,0},0)}{tg^2 \theta k_0^2 \epsilon_{sup}} \quad (15)$$

Таким образом, в окрестности точки $\mathbf{k}_{\perp,inc} = (0,0)$ ПФ содержит только квадратичные члены. В этом случае, как легко видеть из формулы (8), ПФ (14) реализует следующую операцию дифференцирования второго порядка поперечного профиля x -компоненты электрического поля падающего пучка:

$$E_{refl,x}(x_{inc}, y_{inc}, 0) = -c_{x,2} \frac{\partial^2 E_{inc,x}(x_{inc}, y_{inc}, 0)}{\partial x_{inc}^2} - c_{y,2} \frac{\partial^2 E_{inc,x}(x_{inc}, y_{inc}, 0)}{\partial y_{inc}^2} \quad (16)$$

В работе [9] показано, что двойная МДМ-структура в случае двумерного падающего пучка осуществляет вычисление второй производной выбранной компоненты электромагнитного

поля по пространственной переменной x_{inc} . Для случая трехмерного пучка, как показывает формула (16), это не так. Из-за того, что для кросс-поляризованной падающей волны коэффициент отражения (в рассматриваемом случае — $R_{\text{TE}}(\mathbf{k}_{\perp})$) в общем случае не обращается в нуль при $\mathbf{k}_{\perp} = (k_{x,0}, 0)$, в отраженном пучке дополнительно появляется вторая производная по переменной y_{inc} . Ненулевое значение коэффициента отражения $R_{\text{TE}}(k_{x,0}, 0)$ дает возможность использовать двойную МДМ-структуру для оптического вычисления оператора Лапласа. Данный оператор (с точностью до постоянного множителя) будет вычисляться при $c_{x,2} = c_{y,2}$ в (14).

4. Расчет двойной МДМ-структуры для вычисления оператора Лапласа

Исследуем возможность вычисления оператора Лапласа с помощью двойной МДМ-структуры. Согласно (14)–(16), для этого необходимо выполнение условия $c_{x,2} = c_{y,2}$. Для исследования были выбраны двойные МДМ-структуры типа “Au–SiO₂–Ag–SiO₂–Ag–TiO₂–Au”. В качестве материалов слоев в таких структурах используются золото (Au), диоксид кремния (SiO₂), серебро (Ag) и диоксид титана (TiO₂) в указанном выше порядке. В качестве материалов над и под структурой будем использовать воздух и диоксид кремния. Отметим также, что для каждого фиксированного угла падения пучка θ существует целый класс двойных МДМ-структур, имеющих нуль отражения 2-го порядка. Структуры данного класса параметризованы толщиной нижнего металлического слоя [9]. Это означает, что для различных толщин нижнего слоя получаются различные двойные МДМ-структуры с нулями отражения 2-го порядка. Таким образом, можно попытаться выполнить условие $c_{x,2} = c_{y,2}$ за счет выбора параметров θ и h_m .

Для исследования возможности выполнения условия $c_{x,2} = c_{y,2}$ двойные МДМ-структуры рассчитывались при различных значениях (θ, h_m) из условия получения нуля второго порядка для ТМ-поляризации при длине волны $\lambda = 630$ нм. Для расчета коэффициентов отражения, входящих в ПФ (9), использовался численно устойчивый метод [16]. В результате расчетов была найдена двойная МДМ-структура, для которой при параметрах $\theta = 36^\circ$, $h_m = 105$ нм условие $c_{x,2} = c_{y,2}$ выполняется с высокой точностью. Для данной структуры $c_{x,2} = 0,057 \times e^{0,940i}$ мкм², $c_{y,2} = 0,056 \times e^{0,940i}$ мкм², так что относительная ошибка $|c_{x,2} - c_{y,2}| / |c_{x,2}|$ выполнения условия $c_{x,2} = c_{y,2}$ составляет всего 0,017. Толщины слоев (начиная с верхнего) рассчитанной структуры равны

$$h_{\text{MDM},2} = (10,0; 132,3; 8,6; 52,2; 33,6; 74,4; 105,0) \text{ нм.} \quad (17)$$

Исследуем применение двойной МДМ-структуры (17) для вычисления оператора Лапласа на примере падающих линейно поляризованных пучков с поперечными профилями x -компонент электрического поля, соответствующими модам Эрмита–Гаусса:

$$E_{\text{inc},x}(x_{\text{inc}}, y_{\text{inc}}, 0) = U_{m,n}(x_{\text{inc}}, y_{\text{inc}}) = H_m \left(\sqrt{2} \frac{x_{\text{inc}}}{\sigma} \right) H_n \left(\sqrt{2} \frac{y_{\text{inc}}}{\sigma} \right) \exp \left(-\frac{x_{\text{inc}}^2 + y_{\text{inc}}^2}{\sigma^2} \right) \quad (18)$$

где $H_m(x)$ — многочлен Эрмита. Будем считать, что x -компоненты электрических полей падающих пучков соответствуют модам Эрмита–Гаусса $U_{1,0}(x_{\text{inc}}, y_{\text{inc}})$ и $U_{1,1}(x_{\text{inc}}, y_{\text{inc}})$ при $\sigma = 20$ мкм. На рис. 3 показаны x -компоненты электрического поля падающих пучков, модули численно рассчитанных по формуле (8) x -компонент электрического поля отраженных пучков, а также модельные функции

$$E_{\text{model},x}(x_{\text{refl}}, y_{\text{refl}}) = -c_{x,2} \left[\frac{\partial^2}{\partial x_{\text{refl}}^2} - \frac{\partial^2}{\partial y_{\text{refl}}^2} \right] U_{m,n}(x_{\text{refl}}, y_{\text{refl}}), \quad (19)$$

где $(m, n) = (1, 0)$ и $(m, n) = (1, 1)$. В данном случае модельные функции являются результатом применения оператора Лапласа с множителем $-c_{x,2}$ к функциям $U_{1,0}(x_{\text{refl}}, y_{\text{refl}})$, $U_{1,1}(x_{\text{refl}}, y_{\text{refl}})$, что соответствует преобразованию (16) при $c_{x,2} = c_{y,2}$.

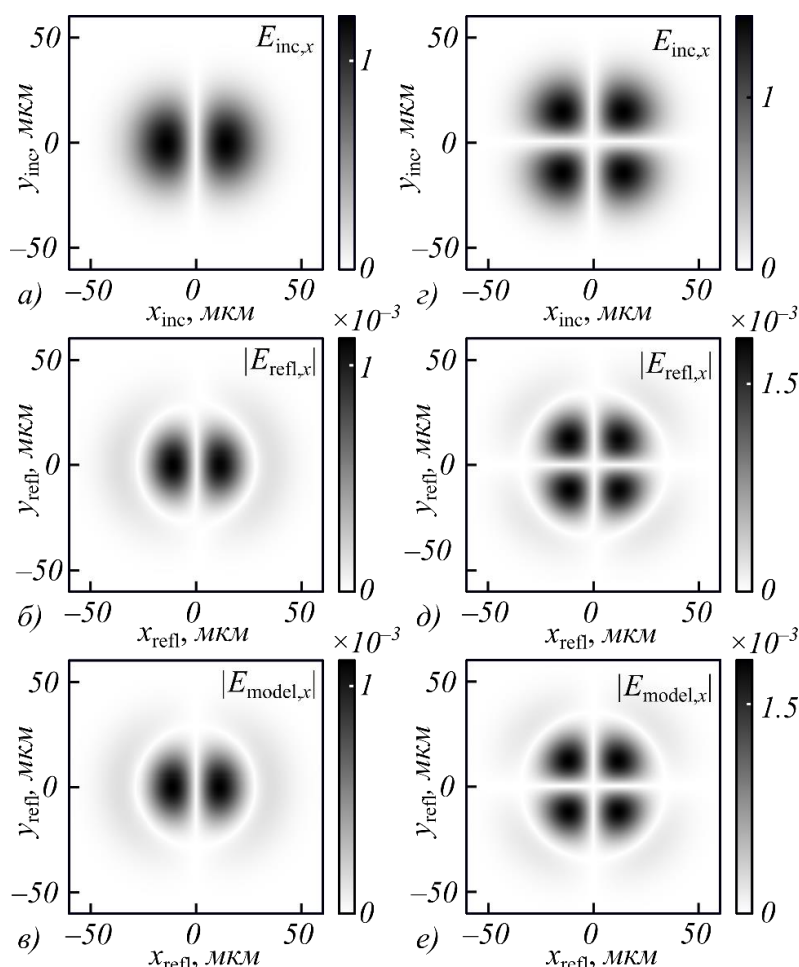


Рис. 3. Профили x -компонент электрического поля падающего, отраженного и модельного пучков для моды $U_{1,0}$ (а-в) и моды $U_{1,1}$ (г-е)

Рисунок 3 показывает высокое качество вычисления оператора Лапласа. Действительно, численно рассчитанные x -компоненты электрического поля отраженных пучков (рис. 3б,д) визуально очень похожи на модельные функции (рис. 3в,е). Нормированное среднеквадратическое отклонение численно рассчитанных компонент $E_{\text{refl},x}$ от модельных функций $E_{\text{model},x}$ составляет всего 0,62% для моды Эрмита–Гаусса $U_{1,0}(x_{\text{inc}}, y_{\text{inc}})$ и 0,99% для моды Эрмита–Гаусса $U_{1,1}(x_{\text{inc}}, y_{\text{inc}})$.

Заключение

Рассмотрено представление трехмерного линейно-поляризованного светового пучка, наклонно падающего на слоистую структуру, в базисе ТЕ- и ТМ-поляризованных плоских волн. Получена ПФ, описывающая преобразование основной поперечной компоненты электрического поля падающего пучка, происходящее при отражении пучка от слоистой структуры. Показано, что при наклонном падении линейно поляризованного пучка на слоистую структуру, состоящую из двух трехслойных структур «металл-диэлектрик-металл» и имеющую ноль второго порядка по пространственной частоте, возможно оптическое выполнение операции пространственного дифференцирования второго порядка. Частным случаем данной операции является операция вычисления оператора Лапласа. Рассчитана слоистая металлодиэлектрическая структура для оптического вычисления оператора Лапласа при отражении в геометрии наклонного падения. В рамках численного моделирования на примере мод Эрмита–Гаусса показано, что указанная операции может быть реализована с высоким качеством (при нормированной среднеквадратичной ошибке менее 1%).

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00514).

Список источников

- [1] **Silva, A.** Performing Mathematical Operations with Metamaterials / A. Silva, F. Monticone, G. Castaldi, V. Galdi, A. Alù, N. Engheta // *Science*. — 2014. — Vol. 343. — № 6167. — P. 160–163. — DOI: 10.1126/science.1242818.
- [2] **Zhou, Y.** Flat optics for image differentiation / Y. Zhou, H. Zheng, I. I. Kravchenko, J. Valentine // *Nature Photonics*. — 2020. — Vol. 14. — P. 316–323. — DOI: 10.1038/s41566-020-0591-3.
- [3] **Bykov, D. A.** Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, V. A. Soifer // *Optics Letters*. — 2011. — Vol. 36. — № 17. — P. 3509–3511. — DOI: 10.1364/OL.36.003509.
- [4] **Dong, Z.** Optical spatial differentiator based on subwavelength high-contrast gratings / Z. Dong, J. Si, X. Yu, X. Deng // *Applied Physics Letters*. — 2018. — Vol. 112. — № 18. — P. 181102. — DOI: 10.1063/1.5026309.
- [5] **Bykov, D. A.** First-order optical spatial differentiator based on a guided-mode resonant grating / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, A. A. Morozov, V. V. Podlipnov, E. A. Bezus, P. Verma, V. A. Soifer // *Optics Express*. — 2018. — Vol. 26. — № 8. — P. 10997–11006. — DOI: 10.1364/OE.26.010997.
- [6] **Huang, J.** Spatiotemporal Differentiators Generating Optical Vortices with Transverse Orbital Angular Momentum and Detecting Sharp Change of Pulse Envelope / J. Huang, J. Zhang, T. Zhu, Z. Ruan // *Laser & Photonics Review*. — 2022. — Vol. 16. — № 5. — P. 2100357. — DOI: 10.1002/lpor.202100357.
- [7] **Doskolovich, L. L.** Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating / L. L. Doskolovich, D. A. Bykov, E. A. Bezus, V. A. Soifer // *Optics Letters*. — 2014. — Vol. 39. — № 5. — P. 1278–1281. — DOI: 10.1364/OL.39.001278.
- [8] **Kashapov, A. I.** Spatial differentiation of optical beams using a resonant metal-dielectric-metal structure / A. I. Kashapov, L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, D. A. Bykov, V. A. Soifer // *Journal of Optics*. — 2021. — Vol. 23. — № 2. — P. 023501. — DOI: 10.1088/2040-8986/abe63b.

- [9] **Doskolovich, L. L.** Optical properties of cascaded metal-dielectric-metal structures and their application to the differentiation of optical signals / L. L. Doskolovich, A. I. Kashapov, E. A. Bezus, D. A. Bykov // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. — 2022. — Vol. 52. — P. 101069. — DOI: 10.1016/j.photonics.2022.101069.
- [10] **Zhu, T.** Plasmonic computing of spatial differentiation / T. Zhu, Y. Zhou, Y. Lou, H. Ye, M. Qiu, Z. Ruan, S. Fan // *Nature Communications*. — 2017. — Vol. 8. — P. 15391. — DOI: 10.1038/ncomms15391.
- [11] **Bykov, D. A.** Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, V. A. Soifer // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22. — № 21. — P. 25084–25092. — DOI: 10.1364/OE.22.025084.
- [12] **Wesemann, L.** Selective near-perfect absorbing mirror as a spatial frequency filter for optical image processing / L. Wesemann, E. Panchenko, K. Singh, E. D. Gaspera, D. E. Gómez, T. J. Davis, A. Roberts // *APL Photonics*. — 2019. — Vol. 4. — № 10. — P. 100801. — DOI: 10.1063/1.5113650.
- [13] **Guo, C.** Photonic crystal slab Laplace operator for image differentiation / C. Guo, M. Xiao, M. Minkov, Y. Shi, S. Fan // *Optica*. — 2018. — Vol. 5. — № 3. — P. 251–256. — DOI: 10.1364/OPTICA.5.000251.
- [14] **Pan, D.** Laplace metasurfaces for optical analog computing based on quasi-bound states in the continuum / D. Pan, L. Wan, M. Ouyang, W. Zhang, A. A. Potapov, W. Liu, Z. Liang, T. Feng, Z. Li // *Photonics Research*. — 2021. — Vol. 9. — № 9. — P. 1758–1766. — DOI: 10.1364/PRJ.426827.
- [15] **Doskolovich, L. L.** Optical computation of the Laplace operator at oblique incidence using a multilayer metal-dielectric structure / L. L. Doskolovich, A. I. Kashapov, E. A. Bezus, N. V. Golovastikov, D. A. Bykov // *Optics Express*. — 2023. — Vol. 31. — № 10. — P. 17050–17064.
- [16] **Moharam, M. G.** Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach / M. G. Moharam, D. A. Pommet, E. B. Grann, T. K. Gaylord // *Journal of the Optical Society of America A*. — 1995. — Vol. 12. — № 5. — P. 1077–1086. — DOI: 10.1364/JOSAA.12.001077.

Second-order optical differentiation of a 3D light beam using a multilayer metal-dielectric structure

L. L. Doskolovich^{1,2}, *A. I. Kashapov*^{1,2}, *E. A. Bezus*^{1,2}, *N. V. Golovastikov*^{1,2}, *D. A. Bykov*^{1,2}

¹ IPSI RAS – Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Samara, Russia

² Samara National Research University, Samara, Russia

We investigate the optical implementation of a second-order differentiation operation using a metal-dielectric layered structure in the oblique incidence geometry. It is shown that the transformation of the profile of a three-dimensional light beam occurring upon its reflection from a layered structure can be described using the theory of linear systems. The transfer function of the corresponding linear system is obtained, and it is shown that if a layered structure has a reflection zero of the second order with respect to the spatial frequency for one of the polarizations, the transformation performed by the structure corresponds to the weighted sum of the second derivatives of the incident beam profile with respect to the spatial coordinates. Using the presented theoretical description, layered metal-dielectric structure for computing the Laplace operator of the profile of a three-dimensional linearly polarized light beam is calculated. The presented numerical simulation results demonstrate high-quality computation of this operator.

Keywords: Optical differentiation, Second derivative, Laplace operator, Layered structure, Transfer function.

Апериодическая дифракционная решетка на основе распределения нулей ζ -функции Римана

А. Е. Мадисон¹, П. А. Мадисон^{1,2}, Д. А. Козодаев³, А. Н. Казанков³, В. А. Мошников²

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», кампус в Санкт-Петербурге, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

³ ООО «Активная Фотоника», Москва, Зеленоград, Россия

Проанализированы ряды Фурье по корням дзета-функции Римана и найдены точные количественные соотношения для положений и интенсивностей появляющихся в таких спектрах пиков. Обсуждается возможность создания апериодической дифракционной решетки, щели которой расположены в соответствии с распределением нетривиальных нулей дзета-функции Римана. Методами контактной атомно-силовой литографии создан действующий прототип такой апериодической решетки. Экспериментально получена картина дифракции, для которой положение дифракционных пиков соответствует простым числам и их степеням.

Ключевые слова: Апериодические кристаллы, Дзета-функция Римана, Дифракционные оптические элементы.

Цитирование: **Мадисон, А. Е.** Апериодическая дифракционная решетка на основе распределения нулей ζ -функции Римана / А. Е. Мадисон, П. А. Мадисон, Д. А. Козодаев, А. Н. Казанков, В. А. Мошников // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 69–73.

Введение

Апериодический порядок широко используется в нанофотонике [1]. Его использование открывает новые перспективы в создании новых материалов с уникальными свойствами. В частности, одним из перспективных направлений использования апериодического порядка является создание материалов с эффектом оптического и акустического маскирования (так называемой «шапки-невидимки»), которые могут стать основой для создания материалов следующего поколения стелс-технологий [2].

Апериодические структуры могут характеризоваться необычными дифракционными свойствами. Для них не обязательно должно выполняться утверждение, что для когерентной интерференции лучей необходимо, чтобы на оптической разности хода укладывалось бы целое число длин волн. В частности, таким примером является созданная нами апериодическая дифракционная решетка, щели которой расположены в соответствии с распределением нетривиальных нулей ζ -функции Римана.

Результаты представлены ниже.

1. Суммирование комплексных экспонент по нулям ζ -функции

Римана

Дайсон предложил оригинальное и строгое с математической точки зрения определение квазикристалла [3]: «Квазикристалл – это распределение точечных масс, Фурье-образом которого является дискретным распределением частот». Также он обратил внимание на аналогию между распределением нулей ζ -функции Римана и квазикристаллами. В частности, он отметил, что если гипотеза Римана верна, то нули ζ -функции образуют одномерный квазикристалл по определению – они образуют одномерное распределение точек вдоль критической линии, а их спектр, как показал Одлышко [4], скорее всего, также представляет собой чисто дискретное распределение. Мазур и Стейн высказали предположение, что теоретическое обоснование наблюдаемого феномена могло бы быть получено при помощи явной формулы Вейля [5], но строгого доказательства в литературе нам найти не удалось.

Мы рассмотрели распределение δ -функций Дирака по нулям ζ -функции Римана и исследовали его Фурье-спектр [6]. Преобразование Фурье в таком случае сводится к суммированию комплексных экспонент по нулям ζ -функции Римана:

$$S(t) = \sum \exp(i\gamma_k t),$$

где γ_k – нетривиальные нули ζ -функции.

В результате теоретического анализа спектра $\Re(S(t))$ и численного моделирования формы пиков нами было установлено, что в спектре присутствует непрерывная компонента, на фоне которой появляются острые пики. Все пики за исключением центрального имеют одинаковую форму, описываемую функцией кардинального синуса. Центральный пик описывается линейной комбинацией кардинального синуса и интегрального синуса, делённого на t . Пики расположены на логарифмах натуральных чисел $t = \ln n$, при этом их амплитуда определяется значениями функции фон Мангольдта $\Lambda(n)$.

Описанные выше закономерности могут быть использованы в качестве теоретической базы для создания интерференционных и дифракционных оптических элементов нового типа. Ранее в литературе обсуждалась принципиальная возможность конструирования некоего прибора, который предлагалось назвать интерферометром Римана [7]. Предлагалась конструкция, состоящая из специального набора точно позиционированных полупрозрачных зеркал или оптических расщепителей для воспроизведения положения нулей ζ -функции, однако практическая реализации предложенной схемы представляется затруднительной.

Нами впервые получен оптический элемент, в основе функционирования которого лежит пространственное расположение корней ζ -функции Римана.

2. Аперидическая дифракционная решетка

Так как дифракционная картина по сути своей является Фурье-образом, то существует принципиальная возможность создания интерференционного прибора нового типа – дифракционной аперидической решетки, щели которой расположены в соответствии с

распределением нетривиальных нулей ζ -функции Римана. На поверхности прозрачной пластины требовалось создать аperiodическую систему прозрачных щелей, разделенных непрозрачными (шероховатыми) промежутками различной ширины. Позиции щелей должны были соответствовать значениям нулей ζ -функции с некоторым масштабным коэффициентом. Тогда, согласно нашим оценкам, следовало ожидать появления необычной дифракционной картины с рефлексами на логарифмах простых чисел и их степеней. Если число является составным, то рефлекс будет отсутствовать (будет происходить погасание рефлекса).

Угол дифракции определяется формулой:

$$(2\pi/\lambda) \cdot a \sin \varphi = m \ln p,$$

где φ — угол дифракции, λ — длина волны излучения (в частности, в наших экспериментах использовался лазерный диод с длиной волны $\lambda = 0.633$ мкм), a — характерный масштабный множитель, в соответствии с которым значения корней ζ -функции определяют позиции щелей (в наших экспериментах были изготовлены два варианта решеток с масштабными коэффициентами 1.0 и 0.8 мкм), p — простое число, m — степень простого числа (порядок рефлекса).

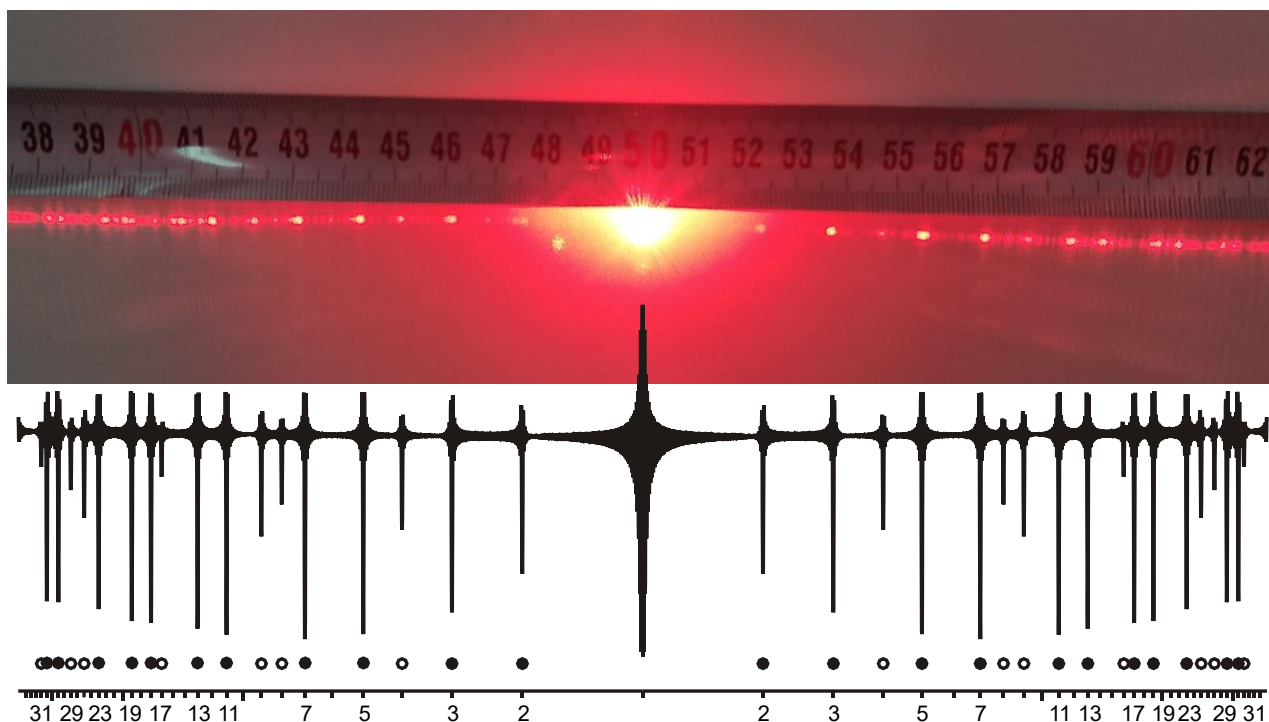
Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды, при этом для амплитуды дифрагированного пучка справедливо выражение:

$$A_{\max} \propto n^{-1/2} \Lambda(n) = p^{-m/2} \ln p.$$

Прототипы аperiodических дифракционных решеток изготавливались методами контактной атомно-силовой литографии с использованием сканирующего зондового микроскопа NTEGRA, НТ-МДТ (Зеленоград). Было подготовлено несколько вариантов шаблонов и осуществлена отладка режимов силовой литографии на подложках из различных материалов. Средняя глубина рельефа варьировалась в итоге от 50 до 300 нм.

Наилучшие результаты были достигнуты для следующего варианта: сканирующий зондовый микроскоп NTEGRA с увеличенным полем сканирования 150×150 мкм², зонд алмазный монокристаллический DRPS-In; материал подложки — полиэтилентерефталат (SIQINZONGWA PET); шаблон: размер активной области — 150×150 мкм², масштабный множитель $a = 0.8$ мкм, число щелей — 73, расчетная ширина отдельной щели — 0.8 мкм, шаг прохода «непрозрачных» областей — 0.3 мкм, число проходов прямолинейных участков шаблона — 3.

Экспериментальная картина дифракции для оптимального случая представлена на рис. 1 (расстояние от решетки до экрана было ~30 см). Ниже для сравнения представлен Фурье-спектр от соответствующим образом упорядоченной последовательности δ -функций [6].



Сверху — картина дифракции (эксперимент); снизу — Фурье-спектр последовательности δ -функций, упорядоченных в соответствии с распределением нетривиальных нулей ζ -функции Римана (расчет); пики соответствуют простым числам и их степеням

Рис. 1. Дифракция на аperiodической решетке, щели которой расположены в соответствии с распределением нетривиальных нулей ζ -функции Римана

Из сравнения экспериментальной дифракционной картины с расчетным Фурье-спектром видно, что, как и ожидалось, положения рефлексов действительно соответствуют простым числам. Незначительные отличия объясняются тем, что координаты рефлексов на плоском экране соответствуют тангенсу угла дифракции, а положения пиков Фурье-спектра — синусу угла дифракции.

Представленные на рис. 1 результаты наглядно иллюстрируют суть гипотезы Гильберта-Пойи, согласно которой нули ζ -функции интерпретируются как спектр. Система δ -функций, расположенных на нулях ζ -функции, и система δ -функций, расположенных на логарифмах простых чисел и их степеней, взаимно дуальны друг другу (в смысле прямого и обратного преобразований Фурье, с точностью до дополнительной непрерывной компоненты). Помимо этого, наши результаты также разрушают два прочно укоренившихся стереотипа. Во-первых, многие исследователи обычно полагают, что для когерентного сложения волн необходимо, чтобы на оптической разности хода укладывалось бы целое число длин волн. Для аperiodического порядка условие дифракции Брэгга может не выполняться. Второй стереотип связан с предположением, что появление простых чисел в ряду натуральных чисел является практически непредсказуемым и кажется абсолютно случайным. Однако мы видим, что простые числа естественным образом появляются в спектре некоторого весьма специфического дифракционного оптического элемента.

Заключение

Исследована возможность создания аперидической дифракционной решетки, щели которой расположены в соответствии с распределением нетривиальных нулей дзета-функции Римана. Методами контактной атомно-силовой литографии создан действующий прототип такой аперидической решетки. Экспериментально получена картина дифракции, при этом положение дифракционных пиков соответствует простым числам и их степеням.

Список источников

- [1] **Dal Negro, L.** Optics of aperiodic structures: Fundamentals and device applications / L. Dal Negro (ed.). — CRC Press, 2014. — 490 p.
- [2] **Boriskina, S. V.** Quasicrystals: Making invisible materials / S. V. Boriskina // Nature Photon. — 2015. — Vol 9. — P. 422–424.
- [3] **Dyson, F.** Birds and frogs / F. Dyson // Notices Amer. Math. Soc. — 2009. — Vol 56. — P. 212–223.
- [4] **Odlyzko, A. M.** Primes, quantum chaos, and computers / A. M. Odlyzko // Number theory: Proceedings of a symposium. Board on Mathematical Sciences, National Research Council. — 1990. — P. 35–46.
- [5] **Mazur, B.** Prime numbers and the Riemann hypothesis / B. Mazur, W. Stein. — Cambridge University Press, 2015. — 154 p.
- [6] **Madison, A. E.** Aperiodic crystals, Riemann zeta function, and primes / A. E. Madison, P. A. Madison, S. V. Kozyrev // Struct. Chem. — 2023. — Vol 34. — P. 777–790.
- [7] **Sierra, G.** The Riemann zeros as spectrum and the Riemann hypothesis / G. Sierra // Symmetry. — 2019. — Vol 11. — #494. — 37 p.

Aperiodic diffraction grating based on the distribution of the Riemann zeros

A. E. Madison¹, P. A. Madison^{1,2}, D. A. Kozodaev³, A. N. Kazankov³, V. A. Moshnikov²

¹ National Research University Higher School of Economics, Campus in Saint Petersburg, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia

³ Active Photonics LLC, Moscow, Zelenograd, Russia

Fourier series over Riemann zeta zeros are analyzed. Explicit formula for peak positions and intensities is derived. The possible formation of the aperiodic diffraction grating consisting of an array of slits, which are ordered according to the distribution of Riemann zeta zeros, is discussed. An actual prototype of such a grating is formed by using the atomic force microscopy nanolithography. The corresponding diffraction pattern is experimentally measured showing peaks positioned at primes and prime powers.

Keywords: Aperiodic crystals, Riemann zeta-function, Diffraction optical elements.

Магнито-индуцированная невзаимность в резонансных кремниевых волноводах с высокой степенью поперечного вращения электрического поля

Н. Г. Юхтанов¹, М. В. Рыбин^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Невзаимные устройства в реализации на чипе очень важны для управления световыми сигналами в современной фотонике. Невзаимность часто вызвана магнитооптическими эффектами, но реализовать не сонаправленные магнитные поля в масштабе чипа сложно. Удобно прикладывать внешнее магнитное поле в направлении перпендикулярном плоскости чипа (геометрия Фойгта), что приводит к модам с поперечным вращением электрического поля в плоскости. В нашей работе мы изучаем резонансные кремниевые волноводы, которые не содержат магнитных материалов и поддерживают подобные моды. Такие наноструктуры основаны на коммерчески доступных SOI пластинах со стандартной высотой 220 нм. Змеевидное изгибание изучаемых волноводов позволяет использовать их в качестве фазовых накопителей и предложить схему оптического изолятора на чипе.

Ключевые слова: Резонансные волноводы, Фотонные интегральные схемы, Магнито-индуцированная невзаимность, Фазовращатель, Фотонный кристалл.

Цитирование: Юхтанов, Н. Г. Магнито-индуцированная невзаимность в резонансных кремниевых волноводах с высокой степенью поперечного вращения электрического поля / Н. Г. Юхтанов, М. В. Рыбин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 74–77.

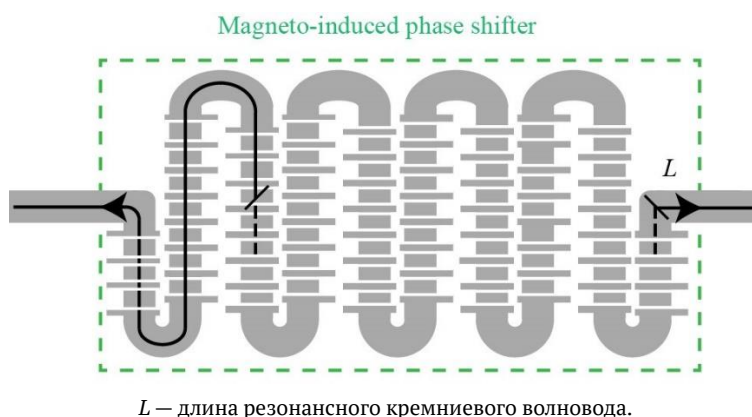
Введение

Разработка интегрированных на чип Оптических Изоляторов (ОИ) на основе платформы кремний на изоляторе (SOI) является перспективной задачей для развития высокоскоростных схем интегральной фотоники. Для реализации невзаимных устройств на чипе используют магнитооптические (МО), электрооптические, нелинейные, и акустооптические эффекты. В подходе с МО эффектами используются материалы с высоким показателем вращения Фарадея, а именно, пленки на основе железо-иттриевого граната [1, 2]. Это позволяет интегрировать устройство на чип с площадью интеграции менее 1 мм² [2]. Благодаря временной модуляции эффективного показателя преломления в подходе с электрооптическими эффектами обеспечивается различное значение коэффициента пропускания для распространения света в прямом и обратном направлении [3]. Невзаимная передача импульсов наблюдается в схемах с нелинейными эффектами, к примеру эффект Керра [4]. Также для достижения невзаимности используется прямая акустооптическая модуляция в кремниевых волноводах с использованием поверхностных акустических волн

(SAWs) [5]. Но технологически простого решения для создания интегрированного на чип ОИ в кремниевой фотонике еще не было предложено.

Основная часть

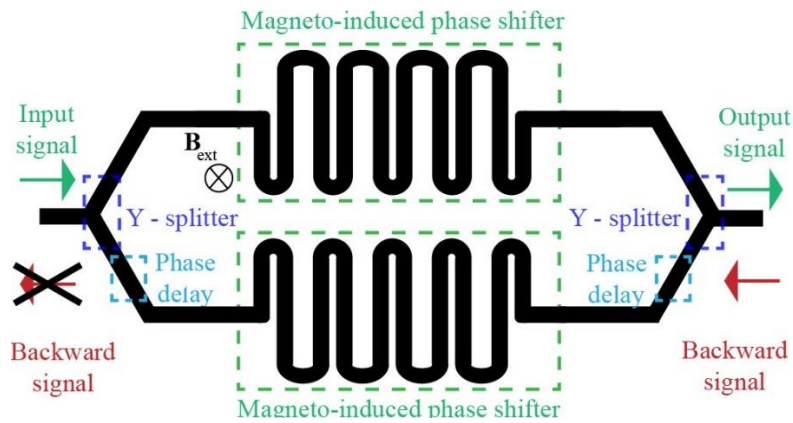
В текущей работе мы изучаем эффект поперечного вращения электрического поля в резонансных кремниевых волноводах, который позволяет нам моделировать магнитоиндуцируемые фазовращатели в удобной для реализации на чипе геометрии Фойгта. Мы рассмотрели три возможных дизайна элементарной ячейки периодического кремниевого волновода. За счет приложенного перпендикулярно волновому вектору магнитного поля (геометрия Фойгта) и нарушению зеркальной симметрии в продольной плоскости волноводов накапливается удельная фаза. Таким образом, рассматриваемые волноводы работают как фазовращательные элементы, которые можно свернуть в компактную геометрию, как показано на рис. 1. Более того, такие магнитоиндуцируемые фазовращатели можно использовать в схеме ОИ на основе интерферометра Маха-Цендера.



L — длина резонансного кремниевого волновода.

Рис. 1. Схема компактного магнитоиндуцируемого фазовращателя на основе одного из трех дизайнов предлагаемых резонансных кремниевых волноводов.

При рассмотрении собственных мод однородного диэлектрического волновода с прямоугольным сечением наблюдается локальное вращение электрических полей. Рассматривая основную TE моду в продольной плоскости центрального сечения, было обнаружено существенное вращение электрических полей в верхней и нижней полуплоскости по часовой и против часовой стрелке, соответственно [6]. Используя нарушение симметрии в кремниевом волноводе, можно добиться ненулевого интегрального вращения электрического поля по объему кремния. Внешнее магнитное поле в геометрии Фойгта приводит к накоплению разности удельной фазы вращения при распространении света по волноводу в прямую и обратную стороны. Используя интерферометр Маха-Цендера с предлагаемым фазовращателем на основе кремниевого волновода с нарушенной симметрией и его зеркальной копией в плечах интерферометра, можно достичь пропускания света только в одну сторону, как показано на рис. 2.



Зеленая стрелка – распространение света в одну сторону,
красная стрелка – распространение света в противоположную сторону.

Рис. 2. Схема интерферометра Маха-Цендера на основе предлагаемых магнето-индуцируемых фазовращателей (один из вариантов показан на рис. 1). Симметричный Y-splitter делит сигнал на два идентичных. Дополнительные элементы фазовой задержки (phase delay) $\pi/4$ в нижнем плече интерферометра нужны для синфазной конструктивной интерференции при распространении в одну сторону и деструктивной интерференции при распространении в обратную сторону.

Ожидаемая эффективная длина кремниевых волноводов в фазовращательном элементе (рис. 1.) лежит в диапазоне $3 < L < 10$ см для получения необходимой фазы $\pi/4$ в плече интерферометра Маха-Цендера. Однако используемая геометрия Фойгта позволяет сворачивать кремниевые волноводы в компактную структуру на чип. Преимуществом такой конфигурации является тот факт, что внешнее магнитное поле остается перпендикулярным направлению распространения света при любом направлении волновода на поверхности.

Для магнето-индуцируемого накопления удельной фазы мы предлагаем использовать только статическое внешнее магнитное поле (от доступных и дешевых постоянных магнитов), которое не требует никаких источников питания. Еще одним преимуществом является то, что предлагаемое устройство простое в изготовлении. Магнето-индуцируемый фазовращатель основан на периодически структурированном кремниевом волноводе и может быть реализован на стандартных пластинах SOI с использованием литографии (без каких-либо специальных магнитных материалов). Таким образом, ожидается, что интеграция в любую оптоэлектронную схему будет простой благодаря совместимости со стандартной электронной технологией КМОП. Более того, предлагаемая технология ожидается дешевой из-за низкой цены неодимовых магнитов, которые используются для создания внешнего магнитного поля.

Заключение

В данной работе предложены три варианта дизайна кремниевых волноводов для создания компактных магнето-индуцируемых фазовращателей, интегрированных на чип. На основе предлагаемых фазовращателей может быть реализован оптический изолятор на чипе с использованием интерферометра Маха-Цендера. В результате моделирования были получены эффективные показатели интегрального поперечного вращения электрических

полей в одну сторону в кремниевых волноводах, которые позволяют сворачивать волноводы в змеевидную форму на чип с площадью менее 1 мм² по нашим оценкам. Для магнитоиндуцируемого накопления фазы использовалась величина магнитного поля 1 Т, которая достигается в коммерчески доступных неодимовых магнитах. Толщина кремниевых волноводов фиксировалась на величине 220 нм, что позволяет изготавливать образцы, используя стандартные SOI пластины.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российским Научным Фондом (грант 21-19-00677). Авторы выражают благодарность Александру Юрьевичу Петрову за плодотворные дискуссии по теме текущей работы.

Список источников

- [1] **Shoji Y.**, Mizumoto T. Silicon waveguide optical isolator with directly bonded magneto-optical garnet //Applied Sciences. – 2019. – Т. 9. – №. 3. – С. 609.
- [2] **Zhang Y.** et al. Monolithic integration of broadband optical isolators for polarization-diverse silicon photonics //Optica. – 2019. – Т. 6. – №. 4. – С. 473-478.
- [3] **Lira H.** et al. Electrically driven nonreciprocity induced by interband photonic transition on a silicon chip //Physical review letters. – 2012. – Т. 109. – №. 3. – С. 033901.
- [4] **Kittlaus E. A.**, Weigel P. O., Jones W. M. Low-loss nonlinear optical isolators in silicon //Nature Photonics. – 2020. – Т. 14. – №. 6. – С. 338-339.
- [5] **Kittlaus E. A.** et al. Electrically driven acousto-optics and broadband non-reciprocity in silicon photonics //Nature Photonics. – 2021. – Т. 15. – №. 1. – С. 43-52.
- [6] **Coles R. J.** et al. Chirality of nanophotonic waveguide with embedded quantum emitter for unidirectional spin transfer //Nature communications. – 2016. – Т. 7. – №. 1. – С. 11183.

Magneto-induced non-reciprocity in resonant silicon waveguides with a high degree of transverse electric field rotation

N. G. Iukhtanov¹, M. V. Rybin^{1,2}

¹ ITMO University, Saint Petersburg, Russia

² Ioffe Institute of the RAS, Saint Petersburg, Russia

Non-reciprocal devices in on-chip implementation are high important for governing light signals in modern photonics. Non-reciprocity is often caused by magneto-optical effects, but implementing non-codirectional magnetic fields on the chip scale is difficult. It is convenient to apply the external magnetic field in the direction normal to the chip plane (Voigt geometry), which leads to modes with in-plane electric field transverse rotation. Here we propose studying resonant magnetic-material-free silicon waveguides that support such modes. These nanostructures are based on standard 220nm commercially available SOI wafers. Their serpentine folding allows using waveguides as on-chip phase shifters and proposing optical isolator scheme.

Keywords: Resonant waveguide, Photonic integrated circuit, Magneto-induced non-reciprocity, Phase shifter, Photonic crystal.

Градиентный метод расчета каскадных ДОЭ и его применение в задачах формирования световых пучков и классификации изображений

Л. Л. Досколович^{1,2}, Д. В. Сошников^{1,2}, Е. В. Бызов^{1,2}, Г. А. Мотз¹, Н. В. Головастиков^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

Рассмотрен градиентный метод расчета каскадных дифракционных оптических элементов (ДОЭ), состоящих из нескольких последовательно расположенных фазовых ДОЭ. С использованием свойства унитарности оператора распространения света через каскадный ДОЭ получены выражения для производных функционала ошибки по фазовым функциям каскадного ДОЭ. Рассмотрено применение градиентного метода в задаче фокусировки различных падающих пучков в области с различными распределениями интенсивности и в задаче классификации изображений. Представленные описания градиентного метода рассматривают задачи синтеза каскадных ДОЭ для фокусировки лазерного излучения и для классификации изображений в рамках единого методологического подхода. Представлены примеры расчета каскадных ДОЭ для решения задач фокусировки и классификации рукописных цифр, демонстрирующие хорошие рабочие характеристики предложенного метода.

Ключевые слова: Дифракционный оптический элемент, Фазовая функция, Скалярная теория дифракции, Градиентный метод, Классификация изображений.

Цитирование: Досколович, Л. Л. Градиентный метод расчета каскадных ДОЭ и его применение в задачах формирования световых пучков и классификации изображений / Л. Л. Досколович, Д. В. Сошников, Е. В. Бызов, Г. А. Мотз, Н. В. Головастиков // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 78–85.

Введение

В настоящее время дифракционные оптические элементы (ДОЭ) являются предметом интенсивных исследований, поскольку они являются компактными, технологичными и позволяют эффективно решать широкий класс задач по преобразованию и фокусировке оптического излучения [1–5]. Задача расчета ДОЭ относится к классу обратных задач и заключается в нахождении фазовой функции ДОЭ, обеспечивающей формирование в заданной области пространства светового поля с заданными свойствами (чаще всего с заданным распределением интенсивности). Для расчета ДОЭ используются различные итерационные алгоритмы, например, алгоритм Гершберга-Сакстона и его модификации. В тоже время данные алгоритмы имеют ограниченную функциональность и не предназначены для решения задачи расчета каскадных ДОЭ, состоящих из нескольких последовательно расположенных фазовых ДОЭ.

В данной работе предложен градиентный метод расчета каскадных ДОЭ и в рамках единого подхода рассмотрено его применение в задачах формирования различных заданных

распределений интенсивности при различных падающих пучках и для задачи оптической классификации изображений [3, 5–9].

1. Постановка задачи

Пусть во входной плоскости $z = f_0$ задана комплексная амплитуда «входного» поля $w_0(\mathbf{u}_0)$, где $\mathbf{u}_0 = (u_0, v_0)$ — декартовы координаты в плоскости $z = f_0$. Данное поле с длиной волны λ последовательно распространяется через n ДОЭ с фазовыми функциями $\varphi_m(\mathbf{u}_m)$, $m = 1 \dots n$, расположенных в плоскостях $z = f_0 \dots f_n$, где $f_0 < f_1 < \dots < f_n$, и далее попадает в «выходную» плоскость расположенную при $z = f_{n+1}$. Будем предполагать, что распространение света между плоскостями описывается в рамках приближения Френеля-Кирхгофа скалярной теории дифракции. Будем также считать, что прохождение света через ДОЭ описывается в приближении тонкого оптического элемента как умножение комплексной амплитуды падающего пучка на функцию комплексного пропуска ДОЭ $T_m(\mathbf{u}_m) = \exp(i \times \varphi_m(\mathbf{u}_m))$, $m = 1 \dots n$. Таким образом, распространение поля через каскад ДОЭ будет описываться формулой:

$$w_{m+1}(\mathbf{u}_{m+1}) = \frac{e^{ikd_{m+1}}}{i\lambda d_{m+1}} \iint w_m(\mathbf{u}_m) T_m(\mathbf{u}_m) e^{i \frac{\pi}{\lambda d_m} (\mathbf{u}_{m+1} - \mathbf{u}_m)^2} d^2 \mathbf{u}_m, \quad m = 0 \dots n, \quad (1)$$

где $w_m(\mathbf{u}_m)$ — комплексная амплитуда поля в плоскости $z = f_m$, $d_m = f_m - f_{m-1}$ — расстояние между плоскостями, $T_0(\mathbf{u}_0) \equiv 1$.

Под обратной задачей будем понимать задачу расчета фазовых функций из условия формирования в выходной плоскости поля с заданным распределением интенсивности $I(\mathbf{u}_{n+1})$. Будем считать, что ошибка формирования заданного распределения интенсивности представляется следующим интегральным критерием квадратичной ошибки:

$$\varepsilon(\varphi_1, \dots, \varphi_n) = \iint [I_{n+1}(\mathbf{u}_{n+1}) - I(\mathbf{u}_{n+1})]^2 d^2 \mathbf{u}_{n+1}, \quad (2)$$

где $I(\mathbf{u}_{n+1}) = |w_{n+1}(\mathbf{u}_{n+1})|^2$ — распределение интенсивности в выходной плоскости.

Можно показать, что расчет производных функционала ε по фазовым функциям ДОЭ $\varphi_m(\mathbf{u}_m)$, $m = 1 \dots n$, сводится к обратному распространению «поля ошибки» [10]:

$$F_{n+1}(\mathbf{u}_{n+1}) = w_{n+1}(\mathbf{u}_{n+1}) \times [I_{n+1}(\mathbf{u}_{n+1}) - I(\mathbf{u}_{n+1})]. \quad (3)$$

При этом, используя свойство унитарности оператора распространения света, производную функционала можно получить в виде [10]:

$$\frac{\partial \varepsilon(\varphi_1, \dots, \varphi_n)}{\partial \varphi_m}(\mathbf{u}_m) = -2 \operatorname{Im} [w_m(\mathbf{u}_m) T_m(\mathbf{u}_m) F_m^*(\mathbf{u}_m)], \quad (4)$$

где функция $F_m(\mathbf{u}_m)$ получена обратным распространением поля ошибки (3) из плоскости $z = f_{n+1}$ в плоскость расположения m -го ДОЭ.

Полученные выражения для производных функционала (4) позволяют использовать для расчета каскадного ДОЭ градиентный метод. В рамках метода расчет фазовых функций осуществляется итерационно по следующей формуле:

$$\varphi_m^{k+1}(\mathbf{u}_m) = \varphi_m^k(\mathbf{u}_m) - t_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi_m}(\mathbf{u}_m), \quad m = 1 \dots n, \quad (5)$$

где k — номер итерации, t_k — шаг градиентного метода на k -ой итерации.

Рассмотренный градиентный метод можно легко обобщить на задачу формирования L заданных распределений интенсивности при L различных падающих пучках [10]. В этом случае в качестве функционала ошибки можно взять сумму функционалов вида (3), представляющих ошибки формирования заданных распределений интенсивности для различных падающих пучков. Вычисление производных такого функционала будет сводиться к вычислению производных функционалов для каждого пучка с использованием формулы (4).

2. Формирование заданных распределений интенсивностей

Пусть во входной плоскости каскадного ДОЭ заданы 4 входных распределения $w_{0,j}(\mathbf{u}_0)$, $j = 1, 2, 3, 4$, соответствующих гауссовым пучкам с радиусом по уровню спада $1/e^2$ $2\sigma = 2,3$ мм и длиной волны $\lambda = 0,532$ мкм, падающим на данную плоскость с различных направлений.

Будем считать, что вектора направлений пучков 1 и 2 лежат в плоскости u_0z и составляют углы $\pm\theta = \pm 0,16^\circ$ с осью z , а вектора направлений пучков 3 и 4 лежат в плоскости v_0z и также составляют углы $\pm\theta$ с осью z . Рассмотрим расчет каскадного ДОЭ, формирующего для описанных входных пучков требуемые распределения интенсивности в выходной плоскости $z = 600$ мм. В качестве требуемых распределений интенсивностей были выбраны следующие изображения: окружность с диаметром 2,3 мм; контур квадрата с размерами стороны 2,3 мм; крест из двух отрезков со сторонами 2,3 мм; «повернутый крест» из двух отрезков, являющихся диагоналями квадрата со стороной 2,3 мм. Толщина линий у требуемых распределений составляет 0,2 мм.

Расчет будем производить для случаев одного ДОЭ (плоскость расположения $z = f_1 = 300$ мм), двух ДОЭ (плоскости расположения $z = f_1 = 200$ мм и $z = f_2 = 400$ мм) и случая трех ДОЭ (плоскости расположения $z = f_1 = 150$ мм, $z = f_2 = 300$ мм и $z = f_3 = 450$ мм). Фазовые функции в плоскостях расположения ДОЭ зададим на сетках 512×512 с шагом $d = 18$ мкм.

Расчет фазовых функций ДОЭ осуществлялся описанным выше градиентным методом. В качестве функционала ошибки использовалась сумма функционалов вида (2) для всех 4-х пучков. При расчете каждого из примеров было сделано 8000 итераций при экспоненциально убывающем шаге (такое число итераций оказалось достаточным для сходимости метода). В качестве начальных фаз использовались нулевые фазы.

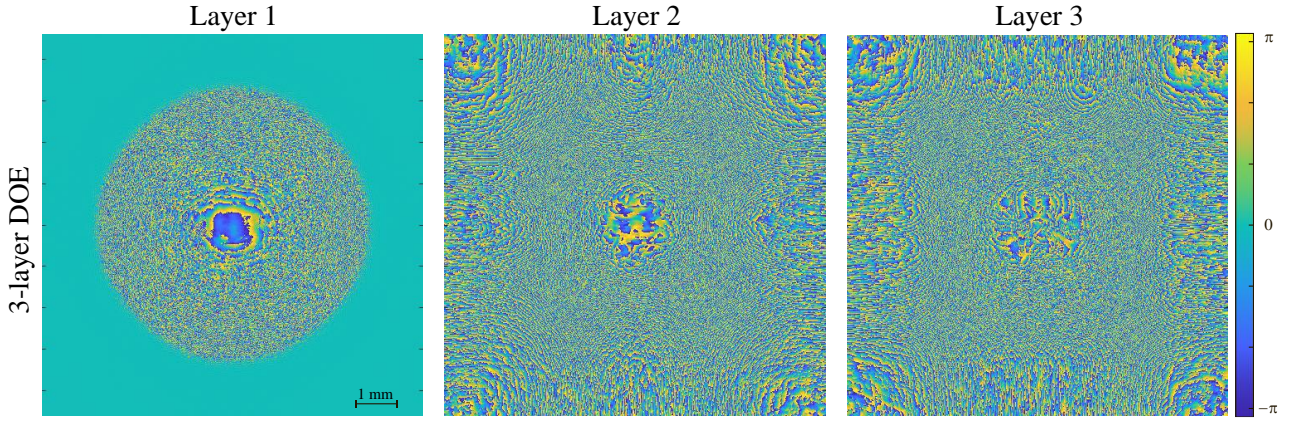


Рис. 1. Рассчитанные фазовые функции для каскада из трех ДОЭ

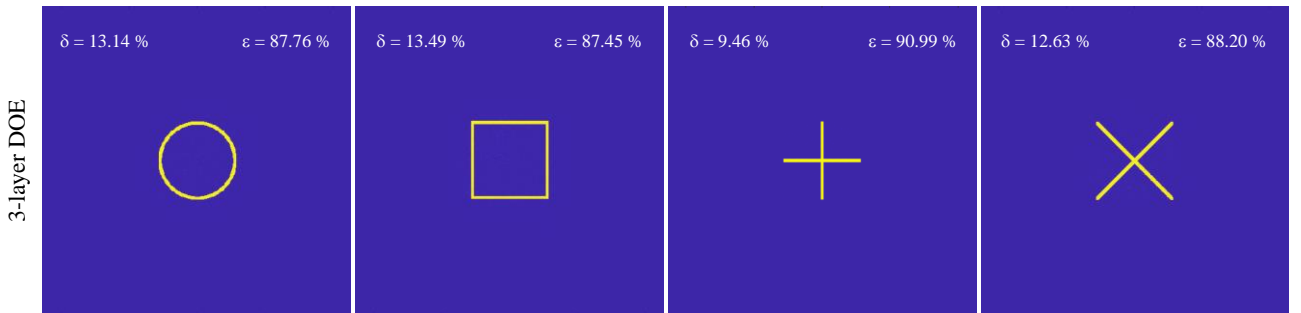


Рис. 2. Рассчитанные распределения интенсивности, формируемые каскадом из трех ДОЭ

В качестве примера на рис. 1 представлены рассчитанные фазовые функции для каскада из трех ДОЭ, а на рис. 2 — расчетные распределения интенсивности, формируемые каскадным ДОЭ при различных падающих пучках. Для характеристики качества формируемых распределений будем использовать значения энергетических эффективностей Eff_j и среднеквадратичных отклонений δ_j . Значения энергетических эффективностей

$$Eff_j = \frac{1}{E_0} \iint_G I_{n+1}(\mathbf{u}_{n+1}) d^2 \mathbf{u}_{n+1}, \quad (6)$$

характеризуют долю энергии $E_0 = \iint |w_0(\mathbf{u}_0)|^2 d^2 \mathbf{u}_0$ падающего пучка, попавшую в требуемую область $G = \{\mathbf{u}_{n+1} | I(\mathbf{u}_{n+1}) \neq 0\}$. Значения среднеквадратичных отклонений

$$\delta = \frac{1}{M} \sqrt{\iint_G [I_{n+1}(\mathbf{u}_{n+1}) - I(\mathbf{u}_{n+1})]^2 d^2 \mathbf{u}_{n+1}} \quad (7)$$

характеризуют среднеквадратическое отклонение (СКО) сформированного распределения для падающего пучка от требуемого распределения. Данные отклонения нормированы на средние значения $M = \frac{1}{\|G\|} \iint_G I_{n+1}(\mathbf{u}_{n+1}) d^2 \mathbf{u}_{n+1}$, где $\|G\|$ — площадь области G .

Таблица 1. Энергетическая эффективность и среднеквадратичное отклонение для каскадов из одного, двух и трех ДОЭ, для различных изображений

Количество ДОЭ	Круг		Квадрат		Крест		Повернутый крест	
	Eff, %	δ , %	Eff, %	δ , %	Eff, %	δ , %	Eff, %	δ , %
1	49,10	77,14	46,50	81,75	53,65	66,95	53,99	67,83
2	74,71	29,88	75,32	29,06	82,77	19,14	78,50	24,79
3	87,76	13,14	13,49	13,49	90,99	9,46	88,20	12,63

В таблице 1 приведены значения энергетической эффективности и СКО для одного ДОЭ, каскада из двух ДОЭ и каскада из трех ДОЭ. Из таблицы 1 видно, что качество формируемых распределений улучшается с увеличением числа ДОЭ. Таким образом, представленные примеры показывают преимущества каскадных ДОЭ перед одиночными в задачах формирования заданных распределений интенсивности при нескольких падающих пучках и подтверждают хорошие рабочие характеристики метода.

3. Классификация изображений

В данном пункте мы рассмотрим расчет каскадного ДОЭ для решения задачи классификации на примере задачи классификации рукописных цифр из базы данных MNIST [11]. Для решения задачи в выходной плоскости ДОЭ были заданы 10 пространственно разделенных квадратных областей G_j с размером стороны 0,5 мм, в которых должны формироваться максимумы энергий для различных входных изображений различных цифр [3, 5]. При этом классификация цифр осуществляется следующим образом. Для каждого входного изображения цифры рассчитываются энергии E_j , формируемые каскадным ДОЭ в заданных областях, и затем выбирается область с максимальной энергией. Номер этой области и будет являться распознанной цифрой.

Сначала рассмотрим решение задачи с помощью одного ДОЭ. Для расчета были выбраны следующие параметры. Входные изображения цифр задавались на сетке из 56×56 отсчетов с шагом $d = 18$ мкм. Фазовая функция ДОЭ задавалась на сетке 512×512 также с шагом $d = 18$ мкм. Будем считать, что ДОЭ расположен в плоскости $z = f_1 = 300$ мм, а выходная плоскость расположена при $z = f_2 = 600$ мм.

При расчете ДОЭ использовалась «обучающая выборка», содержащая 60 000 изображений цифр из базы данных MNIST. Расчет ДОЭ проводился в идеологии нейронных сетей с обучением по батчу, каждый батч содержал 60 случайно выбранных цифр. В качестве начального приближения для фазы ДОЭ использовалась случайная фаза из интервала $[0, 2\pi)$.

В качестве функционала ошибки использовалась сумма функционалов, каждый из которых представлял ошибку распознавания одной цифры. Функционал ошибки для распознавания цифры «j» был задан в виде:

$$\varepsilon^j(\varphi_1, \dots, \varphi_n) = \sum_{k=1}^L (E_k - E_{\max} \delta_{k,j})^2, \quad (8)$$

где $L = 10$ — количество классов (различных цифр), $\delta_{k,j}$ — символ Кронекера, E_{\max} — максимально возможное значение энергии (можно взять всю энергию во входном пучке).

Для функционала (8) поле ошибки может быть получено в следующем виде [10]:

$$F_{n+1}(\mathbf{u}_{n+1}) = w_{n+1}(\mathbf{u}_{n+1}) \sum_{k=1}^L I_k(\mathbf{u}_{n+1}) [E_k - E_{\max} I_j(\mathbf{u}_{n+1})], \quad (9)$$

где $I_j(\mathbf{u}_{n+1})$ — индикаторная функция, равная 1 в области G_j и 0 вне этой области. При этом расчет производных функционала (8) и, соответственно, общего функционала ошибки в виде суммы функционалов (8), осуществляется на основе формулы (4).

После расчета ДОЭ выполнялось «слепое» тестирование его работы на тестовой выборке, содержащей 10 000 изображений, которые не входили в обучающую выборку. Для рассчитанного ДОЭ точность распознавания цифр варьируется в диапазоне от 93,9 % для цифры «9» до 99,2 % для цифры «1». При этом «общая точность распознавания» (т.е. отношение правильно распознанных цифр к общему числу цифр в тестовой выборке) составляет 97,2 %.

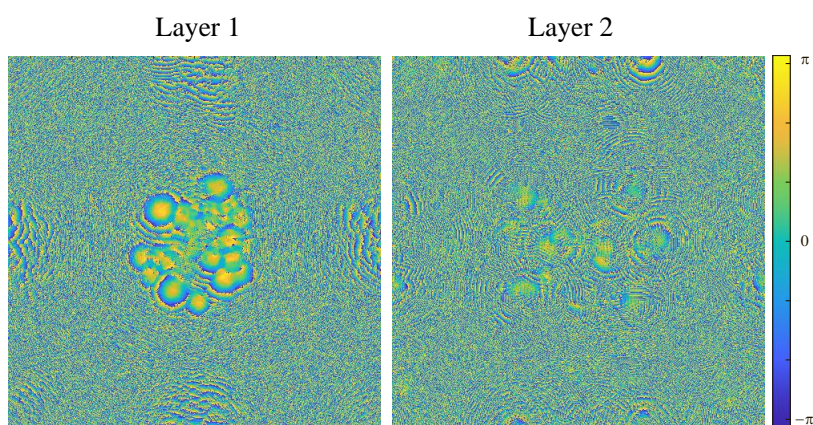


Рис. 3. Фазовые функции каскадного ДОЭ

Accuracy = 97.90%

98.6	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.0	0.3	0.2
0.0	99.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.1	0.4
0.1	0.2	98.9	0.9	0.3	0.2	0.0	0.9	0.5	0.2
0.1	0.1	0.4	97.2	0.0	0.6	0.1	0.3	0.8	0.5
0.1	0.0	0.1	0.0	97.6	0.0	0.4	0.0	0.7	0.7
0.4	0.0	0.0	0.9	0.0	98.7	0.6	0.0	0.6	0.4
0.3	0.1	0.0	0.0	0.4	0.2	98.1	0.0	0.4	0.2
0.1	0.0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.0	98.0	0.6	0.3
0.3	0.0	0.1	0.3	0.2	0.0	0.0	0.1	95.2	0.2
0.0	0.0	0.0	0.4	1.3	0.0	0.0	0.5	0.7	96.9
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

True Labels

Predicted Labels

Рис. 4. Матрица ошибок для каскада из 2-х ДОЭ

Далее был рассчитан каскадный ДОЭ, состоящий из двух ДОЭ, расположенных в плоскостях $z = f_1 = 300$ мм и $z = f_2 = 600$ мм (рис. 3). Выходная плоскость была расположена при $z = 900$ мм. Все остальные параметры (дискретизация, длина волны, размеры апертур) совпадают с параметрами рассмотренного выше примера. Матрица ошибок рассчитанного каскадного представлена ДОЭ на рис. 4. Общая точность распознавания для каскада из двух ДОЭ составляет 97,9 %. Таким образом, увеличение общей точности распознавания при переходе от одного ДОЭ к каскаду из двух ДОЭ составило 0,7 %. Отметим, что дальнейшее увеличение числа ДОЭ фактически не увеличивает точность распознавания.

Заключение

С использованием предложенного градиентного метода рассчитаны одиночные и каскадные ДОЭ для решения задачи фокусировки различных падающих пучков в различные области и задачи классификации рукописных цифр. Представленные результаты численного моделирования демонстрируют хорошие рабочие характеристики предложенного метода. В частности, показано, что одиночный ДОЭ позволяет решить задачу классификации с точностью около 97 %, а каскад из двух ДОЭ — с точностью около 98 %.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части разработки градиентного метода расчета каскадных ДОЭ и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание Самарскому университету, лаборатория «Фотоника для умного дома и умного города», проект FSSS-2021-0016) в части расчета ДОЭ для задач фокусировки и классификации изображений рукописных цифр.

Список источников

- [1] **Zhang, J.** 3D computer-generated holography by non-convex optimization / J. Zhang, N. Pégard, J. Zhong, H. Adesnik, L. Waller // *Optica*. — 2017. — Vol 4. — № 4. — P. 1306–1313.
- [2] **Wang, H.** Dynamic 2D implementation of 3D diffractive optics / H. Wang, R. Piestun // *Optica*. — 2018. — Vol 5. — № 10. — P. 1220–1228.
- [3] **Lin, X.** All-optical machine learning using diffractive deep neural networks / X. Lin, Y. Rivenson, N. T. Yardimci, M. Veli, Y. Luo, M. Jarrahi, A. Ozcan // *Science*. — 2018. — Vol 361. — № 6406. — P. 1004–1008.
- [4] **Schmidt, S.** Tailored micro-optical freeform holograms for integrated complex beam shaping / S. Schmidt, S. Thiele, A. Toulouse, C. Bösel, T. Tiess, A. Herkommer, H. Gross, H. Giessen // *Optica*. — 2020. — Vol 7. — № 10. — P. 1279–1286.
- [5] **Zhou, T.** In situ optical backpropagation training of diffractive optical neural networks / T. Zhou, L. Fang, T. Yan, J. Wu, Y. Li, J. Fan, H. Wu, X. Lin, Q. Dai // *Photonics Research*. — 2020. — Vol 8. — № 6. — P. 940–953.
- [6] **Yan, T.** Fourier-space Diffractive Deep Neural Network / T. Yan, J. Wu, T. Zhou, H. Xie, F. Xu, J. Fan, L. Fang, X. Lin, Q. Dai // *Physical Review Letters*. — 2019. — Vol 123. — № 2. — P. 023901.
- [7] **Zheng, S.** Orthogonality of diffractive deep neural network / S. Zheng, S. Xu, D. Fan // *Optics Letters*. — 2022. — Vol 47. — № 7. — P. 1798–1801.

- [8] **Chang, J.** Hybrid optical-electronic convolutional neural networks with optimized diffractive optics for image classification / J. Chang, V. Sitzmann, X. Dun, W. Heidrich, G. Wetzstein // *Scientific Reports*. — 2018. — Vol 8. — № 1. — P. 12324.
- [9] **Liu, C.** A programmable diffractive deep neural network based on a digital-coding metasurface array / C. Liu, Q. Ma, Z. J. Luo, Q. R. Hong, Q. Xiao, H. C. Zhang, L. Miao, W. M. Yu, Q. Cheng, L. Li, T. J. Cui // *Nature Electronics*. — 2022. — Vol 5. — P. 113–122.
- [10] **Soshnikov, D. V.** Design of Cascaded Diffractive Optical Elements for Optical Beam Shaping and Image Classification Using a Gradient Method / D. V. Soshnikov, L. L. Doskolovich, G. A. Motz, E. V. Byzov, E. A. Bezus, D. A. Bykov, A. A. Mingazov // *Photonics*. — 2023. — Vol 10. — № 7.
- [11] **Lecun, Y.** GradientBased Learning Applied to Document Recognition / Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner // *Proceedings of the IEEE*. — 1998. — Vol 86. — № 11. — P. 2278–2324.

Gradient method for designing cascaded DOEs and its application in the problems of optical beam shaping and image classification

L. L. Doskolovich^{1,2}, D. V. Soshnikov^{1,2}, E. V. Byzov^{1,2}, G. A. Motz¹, N. V. Golovasticov^{1,2}

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

² Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the RAS, Samara, Russia

We present a gradient method for designing cascaded diffractive optical elements (DOEs) consisting of several sequentially located phase DOEs. Using the unitarity property of the operator of light propagation through the cascaded DOE, we obtain explicit expressions for the derivatives of the error functional with respect to the phase functions of the cascaded DOE. We consider the application of the gradient method to the problem of focusing different incident beams to regions with different intensity distributions and to the problem of image classification. The presented description of the gradient method treats the problems of designing cascaded DOEs for focusing laser radiation and for image classification within a unified approach. We present examples of the calculation of cascaded DOEs for focusing different incident beams to different regions and for classifying handwritten digits, which demonstrate high performance of the proposed method.

Keywords: Diffractive optical element, Phase function, Scalar diffraction theory, Gradient method, Image classification.

Применение метода моментов для компенсации aberrаций волнового фронта

П. А. Хорин^{1,2}, С. Г. Волоотовский², П.А. Вечканова¹, С. Н. Хонина^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
Самара, Россия

² Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

Реализован метод моментов для алгоритмизации компенсации aberrаций на основе применения дифракционного оптического элемента, согласованного с базисом функций Цернике. В качестве функционала предложено использование второго центрального момента интенсивности фокального изображения. Проведено исследование второго центрального момента для суперпозиции aberrаций. Показано, что достижение эталонного значения второго момента может служить признаком окончания компенсации aberrации.

Ключевые слова: Волновые aberrации, Метод моментов, Компенсация, Дифракционная оптика.

Цитирование: Хорин, П. А. Применение метода моментов для компенсации aberrаций волнового фронта / П. А. Хорин, С. Г. Волоотовский, П. А. Вечканова, С. Н. Хонина // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 86–98.

Введение

Детектирование, идентификация и компенсация aberrаций волнового фронта востребованы в различных приложениях, включая коррекцию зрения [[1]], улучшение изображающих систем мобильных устройств [[2]], оптических микроскопов и телескопов [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], оптических систем дистанционного зондирования Земли [[4]], моделировании и анализе передачи оптической информации в турбулентной среде [[5]].

Датчик волнового фронта является одним из основных элементов адаптивной системы корректировки лазерного излучения. Его задача – измерять aberrации волнового фронта и передавать результаты этих измерений на обрабатывающее устройство.

Например, волновой фронт светового поля может быть восстановлен по интерферограмме [[6]], методом Гартмана-Шака [[7]], визуализации фазы на основе преобразования пространственного спектра [[8]], адаптивными подходами в совокупности с интеллектуальным анализом данных [[9]].

Однако представленные методы прямым образом не измеряют величину и тип aberrации, а измеряют форму волнового фронта. Детектирование и измерение aberrации впервые предложено в работе [[10]] на основе использования многоканального дифракционного оптического элемента (ДОЭ) [[11]], согласованного с базисом функций Цернике [[12]]. Ещё один метод, который позволяет прямым образом рассчитать величину aberrации основан на голографическом оптическом элементе (ГОЭ) [[13]], а также на основе ДОЭ, согласованном с фазовыми распределениями в виде функций Цернике [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Каждый из методов имеет ряд достоинств и недостатков: ДОЭ, согласованный с базисом функций Цернике, позволяет точно и безошибочно детектировать только слабые aberrации до $0,32\lambda$ [[11]]; использование голографического мультиплекса приводит к сильному и неизбежному перекрестному шуму, что затрудняет обработку полученной информации [Ошибка! Источник ссылки не найден.]; а ДОЭ согласованный с фазовыми распределениями в виде функций Цернике позволяет детектировать aberrации в широком диапазоне, но требует использования итерационного алгоритма с цифровой обработкой информации [[16]].

Рассмотренный в данной работе метод моментов актуален для использования с многоканальными ДОЭ, согласованными как с базисом функций Цернике, так и с фазовыми распределениями. Предложенный метод компенсации aberrаций волнового фронта позволяет упростить потенциальную аппаратную реализацию нового типа датчика волнового фронта за счёт замены сложной цифровой обработки изображения фокального распределение интенсивности в каждом из дифракционных порядков на расчёт центральных моментов.

1. Теоретические основы

В данной работе рассматриваются функции Цернике в следующем виде [[12]]:

$$Z_{nm}(r, \varphi) = A_{nm} R_{nm}(r) S_m(\varphi), \quad (1)$$

где $R_n^m(r)$ – радиальные полиномы Цернике, A_{nm} – нормирующий коэффициент, $S_m(\varphi)$ – азимутальная составляющая:

$$R_n^m(r) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} r^{n-2k}, \quad (2)$$

$$A_{nm} = \begin{cases} \sqrt{2n+2}, m \neq 0 \\ \sqrt{n+1}, m = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$S_m(\varphi) = \begin{cases} 1, m = 0 \\ \cos(m\varphi), m > 0 \\ \sin(m\varphi), m < 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Пусть входное $F_0(r, \varphi)$ поле задано следующим соотношением:

$$F_0(r, \varphi) = A(r, \varphi) \exp[2\pi i S_0(r, \varphi)], \quad (5)$$

где исходная суперпозиция aberrаций имеет следующий вид:

$$S_0(r, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n C_{nm} Z_{nm}(r, \varphi), \quad (6)$$

а компенсирующая суперпозиция представима, как:

$$S_1(r, \varphi) = \sum_{p=0}^P \sum_{q=-p}^p D_{pq} Z_{pq}(r, \varphi). \quad (7)$$

После прохождения модулятора (ДОЭ) входное поле преобразуется следующим образом:

$$F_1(r, \varphi) = F_0(r, \varphi) \exp[-2\pi i S_1(r, \varphi)], \quad (8)$$

$$F_1(r, \varphi) = A(r, \varphi) \exp[2\pi i (S_0(r, \varphi) - S_1(r, \varphi))]. \quad (9)$$

Интенсивность фокального поля для исходного поля $F_0(r, \varphi)$ представимо через преобразование Фурье (обозначено символом \mathfrak{F}):

$$G(x, y) = |\mathfrak{F}[F_1(x, y)]|^2. \quad (10)$$

Тогда сумма горизонтального и вертикального вторых центральных моментов для изображения $G(x, y)$ (далее «момент») имеет следующий вид:

$$F[G(x, y)] = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J G(x_i, y_j) ((x_i - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2), \quad (11)$$

где (x_0, y_0) – математическое ожидание для $G(x, y)$.

Стоит отметить, что в случае $S_0(r, \varphi) = S_1(r, \varphi)$ aberrации исходного поля будут компенсированы и момент (11) будет минимальным $F_{\min}[G(x, y)]$.

2. Численное моделирование

2.1 Безабберационное поле

Рассмотрим входное поле $F_0(r, \varphi)$ у которого исходная суперпозиция aberrаций $S_0(r, \varphi)$ имеет все коэффициенты C_{nm} равные 0. Таким образом получим невозмущенное поле с отсутствием aberrаций.

В статье о модах [[17]] показано, что график функционала при изменении одного параметра показывает интервал сходимости, следовательно, характеризует устойчивость одномерной оптимизации. В данном случае функционалом служит второй центральный момент (11), а параметром служит коэффициент одной из aberrаций.

В ряде численных экспериментов получено распределение интенсивности (10) и значение момента (11) для безабберационного поля после добавления (прохождения модулятора (ДОЭ) с волновой aberrацией) одиночной aberrации разного типа (p, q) с варьируемым коэффициентом D_{pq} . Результаты представлены на рис.1 и в таблице 1.

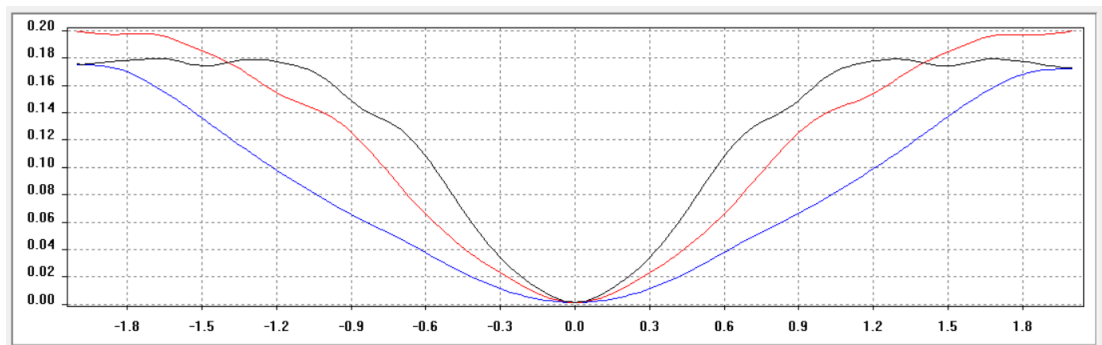


Рис.1. График зависимости момента $F[G(x, y)]$ (11) от величины D_{pq} и типа (p, q) добавленной aberrации к невозмущённому входному полю $F_0(r, \varphi)$. Обозначения типов aberrаций (p, q) : (3,1) – синим, (5,1) – красным, (7,1) – чёрным

Графики на рис.1 показывают, что с ростом модуля коэффициента aberrации D_{pq} значение момента $F[G(x, y)]$ увеличивается на примере Z_{31}, Z_{51}, Z_{71} . Стоит отметить, что для aberrаций с большим p момент увеличивается сильнее.

Кроме того, наблюдается нарушение унимодальности (т.е. присутствует несколько локальных экстремумов) для aberrаций типа Z_{51} и Z_{71} . Однако, это вызвано с выходом фокального изображения за пределы регистрируемой области, что продемонстрировано изображения интенсивности $F_1(r, \varphi)$ в таблице 1.

Таблица 1. Распределение интенсивности $F_1(r, \varphi)$ после добавления aberrации величины D_{pq} и типа (p, q) к невозмущённому входному полю $F_0(r, \varphi)$.

$F_1(r, \varphi)$		D_{pq}			
		0,6	0,9	1,2	1,5
Z_{pq}	Z_{31}				
	Z_{51}				
	Z_{71}				

В таблице 1 представлена интенсивность $F_1(r, \varphi)$ в фокальной плоскости при разных параметрах величины D_{pq} и типа (p, q) добавленной aberrации. Видно, что изображения aberrаций более высокого порядка p выходят за пределы области детектирования при больших значениях параметра D_{pq} и теряют значительную часть энергии.

Аналогичным образом в ряде численных экспериментов получено значение момента для невозмущенного поля с добавлением aberrаций Z_{pq} по типу сферической (Z_{40}) и астигматизма первого (Z_{4-2}), второго (Z_{4-4}) порядка. Распределение значений момента (11) представлены на рис. 2.

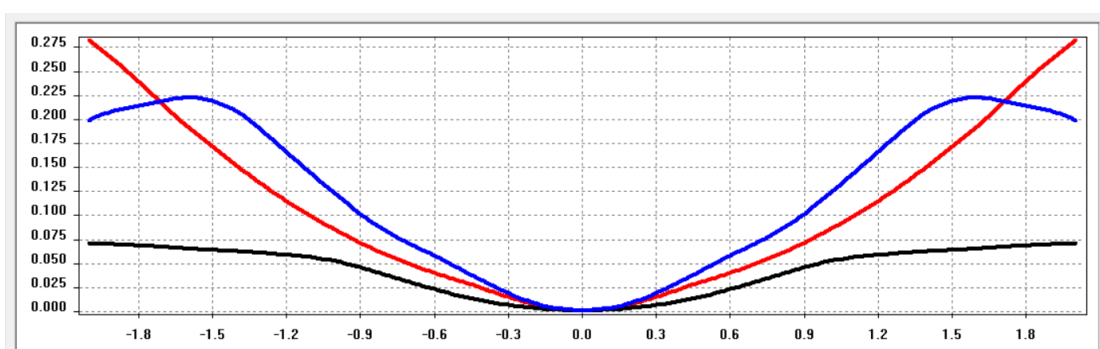


Рис.2. График зависимости момента $F[G(x, y)]$ (11) от величины D_{pq} и типа (p, q) добавленной aberrации к невозмущённому входному полю $F_0(r, \varphi)$. Обозначения типов aberrаций (p, q) : (4,0) – синим, (4,-2) – красным, (4,-4) – чёрным

Получено, что для aberrаций с меньшим меридиальным индексом q добавленной aberrации Z_{pq} момент $F[G(x, y)]$ увеличивается сильнее. Кроме того, наблюдается появление нескольких локальных экстремумов. Причина нарушения унимодальности графиков связана с выходом фокального изображения за пределы регистрируемой области (аналогичная ситуация представлена в таблице 1).

Таким образом, на основе полученных данных можно сделать следующие выводы, которые распространяются на все виды aberrаций. Для них выполняются следующие свойства:

1) с ростом модуля весового коэффициента D_{pq} добавленной aberrации момент $F[G(x, y)]$ увеличивается;

2) нарушение унимодальности графика происходит по причине излишнего увеличения фокального изображения $F_1(r, \varphi)$ и выхода его за пределы регистрируемой области при больших значениях весового коэффициента D_{pq} ;

3) минимальное значение момента $F_{\min}[G(x, y)]$ для невозмущенного исходного поля соответствует нулевому значению весового коэффициента D_{pq} .

Другими словами, добавление aberrации к невозмущенному полю увеличивает значение функционала (момента) фокального изображения. И тем сильнее, чем больше модуль коэффициента этой aberrации. Стоит отметить, что данное утверждение совпадает с известным фактом [Ошибка! Источник ссылки не найден.], что повышение модуля коэффициента aberrации вызывает увеличение площади ненулевой интенсивности в фокальной плоскости, а стало быть и увеличение значения функционала.

2.2 Абerrированное поле с одной aberrацией

Рассмотрим входное поле $F_0(r, \varphi)$ у которого исходная суперпозиция aberrаций $S_0(r, \varphi)$ имеет один коэффициент C_{nm} отличный от 0. Таким образом получим возмущенное поле с одной aberrацией.

Проведём численный эксперимент для **нечётной** aberrации типа кома 2-го порядка Z_{51} с весовым коэффициентом $C_{nm} = 0.5$, тогда $S_0(r, \varphi) = 0.5Z_{51}$ и $F_0(r, \varphi) = A(r, \varphi) \exp[2\pi i 0.5Z_{51}]$. Учитывая (9) $F_1(r, \varphi) = A(r, \varphi) \exp[2\pi i (0.5Z_{51} - S_1(r, \varphi))]$ и для минимизации момента ($F_{\min}[G(x, y)] = 0.05$) и компенсации aberrации необходимо, чтобы $S_1(r, \varphi) = 0.5Z_{51}$.

Получено значение момента (11) для исходного поля $F_0(r, \varphi)$ с одной aberrацией Z_{51} с весовым коэффициентом $C_{nm} = 0.5$ после добавления (с использованием модулятора или ДОЭ) одиночной aberrации разного типа (p, q) с варьируемым коэффициентом D_{pq} . Результаты представлены на рис.3.

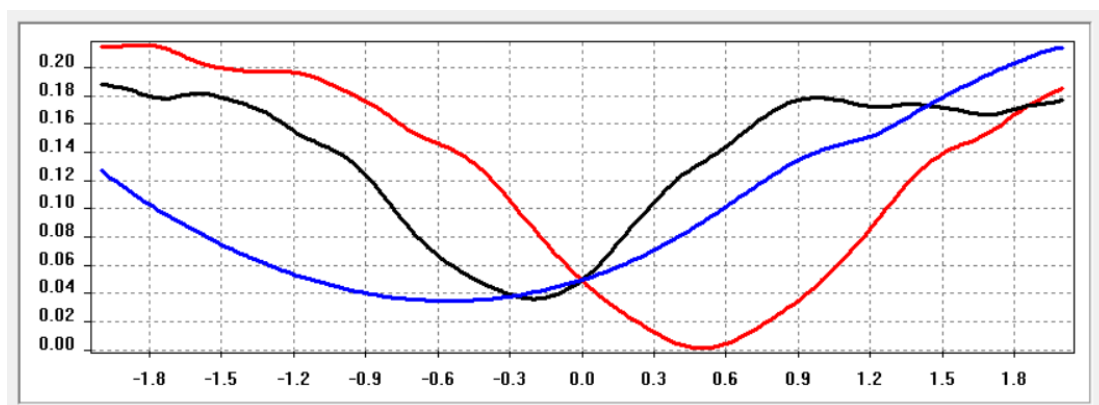


Рис.3. График зависимости момента $F[G(x, y)]$ (11) от величины D_{pq} и типа (p, q) добавленной аберрации к возмущённому входному полю $F_0(r, \varphi)$. Обозначения типов аберраций (p, q) :
 (3,1) – синим, (5,1) – красным, (7,1) – чёрным

На рис. 3 видно, что момент для исходного поля $F_0(r, \varphi)$ с одной аберрацией Z_{51} с весовым коэффициентом $C_{nm} = 0.5$ достигает минимального значения $F_{\min}[G(x, y)] = 0.002$ после добавления одной аберрации типа $(p, q) = (5, 1)$ с весовым коэффициентом $D_{pq} = 0.5$.

В ряде численных экспериментов определено, что минимальное значение момента при добавлении других аберраций превышает полученное значение $F_{\min}[G(x, y)] = 0.002$. Таблица 2 содержит аберрации, уменьшающие момент, их коэффициент и наименьшее значение момента для случая $S_0(r, \varphi) = 0.5Z_{51}$. Стоит отметить, что остальные аберрации не уменьшают момента.

Таблица 2. Зависимость момента $F[G(x, y)]$ (11) от величины D_{pq} и типа (p, q) добавленной аберрации к возмущённому входному полю $F_0(r, \varphi)$ в случае $S_0(r, \varphi) = 0.5Z_{51}$

Аберрация Z_{pq} (p, q)	Значение Коэффициента D_{pq}	Минимальный Момент $F[G(x, y)]$
(5,1)	0,5000	0,0020
(7,1)	-0,2278	0,0508
(3,1)	-0,3079	0,0583
(5,3)	-0,1654	0,0583
(7,3)	-0,1031	0,0587
(3,3)	-0,2515	0,0618
(5,5)	-0,0882	0,0634
(7,7)	0,0809	0,0636
(7,5)	-0,0496	0,0637
(5,-3)	0,0150	0,0639
(7,-3)	0,0100	0,0639

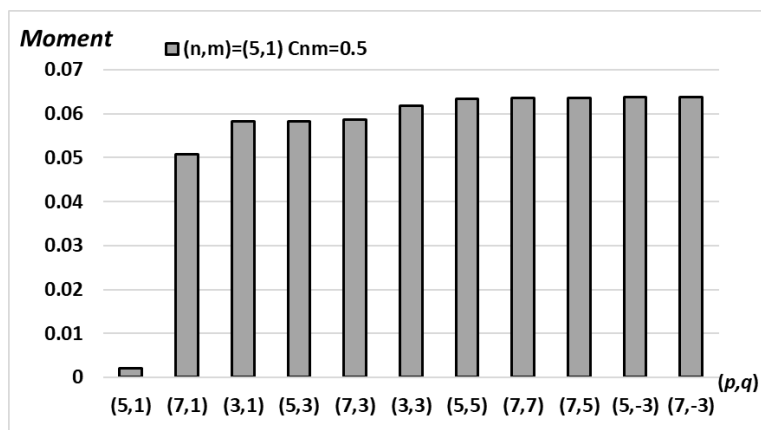


Рис.4. Зависимость минимального момента $F[G(x, y)]$ (11) от величины D_{pq} и типа (p, q) добавленной aberrации к возмущённому входному полю $F_0(r, \varphi)$ в случае $S_0(r, \varphi) = 0.5Z_{51}$ (иллюстрация таблицы 2).

Диаграмма на рис.4 показывает, что существуют aberrации, которые уменьшают момент $F[G(x, y)]$ (11) данной исходной суперпозиции, однако aberrация $(p, q) = (5, 1)$ с коэффициентом $D_{pq} = 0.5$ сильнее других уменьшает момент, т.е. aberrация из исходной суперпозиции сильнее всех уменьшает момент.

Стоит отметить, что существуют aberrации, уменьшающие момент данной исходной суперпозиции, не входящие в исходную суперпозицию ($Z_{51}, Z_{71}, Z_{33}, Z_{53}, Z_{73}$), но они уменьшают момент существенно слабее чем Z_{51} , а именно более чем в 25 раз.

В ряде численных экспериментов определено, что чем больше разность индексов (p, q) с индексами (n, m) , тем больше минимальный момент.

Рассмотрим случай для **чётной** aberrации типа астигматизм 2-го порядка Z_{42} с весовым коэффициентом $C_{nm} = 1.0$, тогда $S_0(r, \varphi) = 1.0Z_{42}$ и $F_0(r, \varphi) = A(r, \varphi) \exp[2\pi i Z_{42}]$. Учитывая (9) $F_1(r, \varphi) = A(r, \varphi) \exp[2\pi i (Z_{42} - S_1(r, \varphi))]$ и для минимизации момента ($F_{min}[G(x, y)] = 0.1$) и компенсации aberrации необходимо, чтобы $S_1(r, \varphi) = Z_{42}$.

Получено значение момента (11) для исходного поля $F_0(r, \varphi)$ с одной aberrацией Z_{42} с весовым коэффициентом $C_{nm} = 1.0$ после добавления (с помощью модулятора или ДОЭ) одиночной aberrации разного типа (p, q) с варьируемым коэффициентом D_{pq} . Результаты представлены в таблице 3, в которой содержится информация об aberrациях, уменьшающих момент, их коэффициент и наименьшее значение момента (остальные aberrации не уменьшают момента).

Таблица 3. Зависимость момента $F[G(x,y)]$ (11) от величины D_{pq} и типа (p,q) добавленной aberrации к возмущённому входному полю $F_0(r, \varphi)$ в случае $S_0(r, \varphi)=Z_{42}$

Аберрация Z_{pq} (p,q)	Значение коэффициента D_{pq}	Минимальный момент $F[G(x,y)]$
(4,2)	1,0000	0,0020
(6,2)	-0,4312	0,0725
(2,2)	-1,0937	0,0930
(6,6)	-0,4375	0,1019

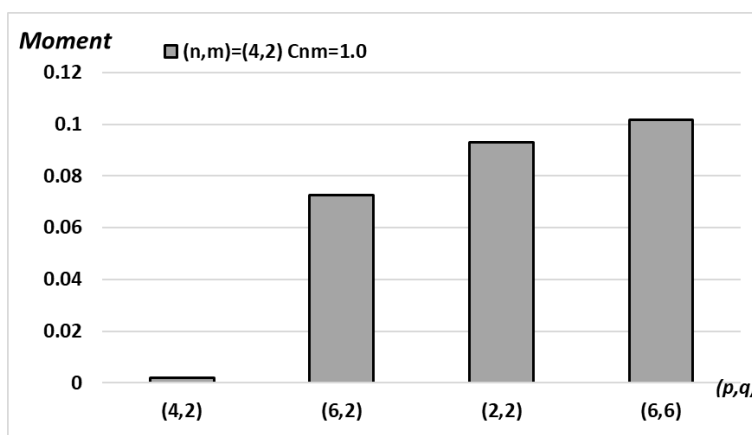


Рис. 5. Зависимость минимального момента $F[G(x,y)]$ (11) от величины D_{pq} и типа (p,q) добавленной aberrации к возмущённому входному полю $F_0(r, \varphi)$ в случае $S_0(r, \varphi)=Z_{42}$ (иллюстрация таблицы 3).

Диаграмма на рис. 5 показывает, что минимальное значение момента $F[G(x,y)]$ (11) для данной исходной суперпозиции достигается при добавлении волновой aberrация Z_{42} с коэффициентом $D_{pq}=1,0$, т.е. aberrация из исходной суперпозиции сильнее всех уменьшает момент.

Стоит отметить, что существуют aberrации, уменьшающие момент данной исходной суперпозиции, не входящие в исходную суперпозицию (Z_{62} , Z_{22} , Z_{66}), но они уменьшают момент существенно слабее чем Z_{42} , а именно более чем в 36 раз.

Аналогичным образом определено, что чем больше разность индексов (p,q) с индексами (n,m) , тем больше минимальный момент.

Таким образом для исходной исходного поля $F_0(r, \varphi)$ с одной **чётной** или **нечётной** aberrацией Z_{nm} верно утверждение, что существует целый набор aberrаций $S_1(r, \varphi) = D_{pq} Z_{pq}$ с разными (p,q) , каждая из которых уменьшает момент $F[G(x,y)]$, но aberrация из исходной суперпозиции $S_1(r, \varphi) = C_{nm} Z_{nm}$ позволяет достигнуть минимальное значение момента $F_{\min}[G(x,y)] = 0.002$.

2.3 Аберрированное поле с несколькими аберрациями

Рассмотрим входное поле $F_0(r, \varphi)$ у которого исходная суперпозиция аберраций $S_0(r, \varphi)$ имеет несколько коэффициентов C_{nm} отличных от 0. Таким образом получим возмущенное поле суперпозицией аберраций.

Рассмотрим случай для суперпозиции двух аберрации: кома 1-го порядка Z_{31} с весовым коэффициентом $C_{31} = -1.0$ и астигматизм 2-го порядка Z_{42} с весовым коэффициентом $C_{42} = -0.5$. Тогда исходная суперпозиция представима, как $S_0(r, \varphi) = -Z_{31} - 0.5Z_{42}$, следовательно, $F_0(r, \varphi) = A(r, \varphi) \exp[2\pi i(-Z_{31} - 0.5Z_{42})]$. Учитывая (9) $F_1(r, \varphi) = A(r, \varphi) \exp[2\pi i(-Z_{31} - 0.5Z_{42} - S_1(r, \varphi))]$ и для минимизации момента ($F_{null}[G(x, y)] = 0.1$) и компенсации аберрации необходимо, чтобы $S_1(r, \varphi) = -Z_{31} - 0.5Z_{42}$.

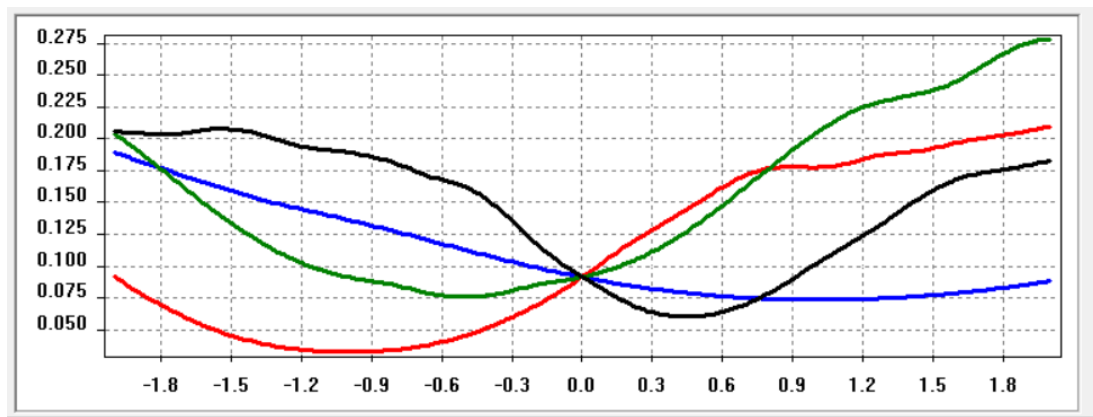


Рис. 6. График зависимости момента $F[G(x, y)]$ (11) от величины D_{pq} и типа (p, q) добавленной аберрации к возмущённому входному полю $F_0(r, \varphi)$. Обозначения типов аберраций (p, q) :
(2,2) – синим, (3,1) – красным, (4,2) – зелёным, (5,1) – чёрным

На рис. 6 видно, что момент для исходного поля $F_0(r, \varphi)$ с суперпозицией $S_0(r, \varphi) = -Z_{31} - 0.5Z_{42}$ достигает минимального значения $F_{min1}[G(x, y)] = 0,03$ после добавления одной аберрации типа $(p, q) = (3, 1)$ с весовым коэффициентом $-D_{pq} = -1,0$. Следующий по величине минимальный момент $F_{min2}[G(x, y)]$ удаётся достигнуть при добавлении только аберрации $S_1(r, \varphi) = -0,5Z_{51}$, что объясняется наименьшей разностью индексов $(p, q) = (5, 1)$ с индексами $(n, m) = (3, 1)$.

Также одной из аберраций, которая уменьшает исходный момент $F_{null}[G(x, y)] = 0.1$ является аберрация из исходной суперпозиции $S_0(r, \varphi)$ типа $(p, q) = (4, 2)$ с весовым коэффициентом $D_{pq} = -0.5$ и приблизительно равное значение момента достижимо при добавления одной аберрации типа $(p, q) = (2, 2)$ с весовым коэффициентом $D_{pq} = -1.0$ (объясняется наименьшей разностью индексов $(p, q) = (2, 2)$ с индексами $(n, m) = (4, 2)$).

Для верификации полученных результатов будем варьировать значение весовых коэффициентов C_{31} и C_{42} в исходной суперпозиции $S_0(r, \varphi) = -C_{31}Z_{31} - C_{42}Z_{42}$ поля $F_0(r, \varphi)$ и

рассчитаем момент $F[G(x, y)]$ при разной величине D_{pq} и типе (p, q) добавленной aberrации $S_1(r, \varphi)$.

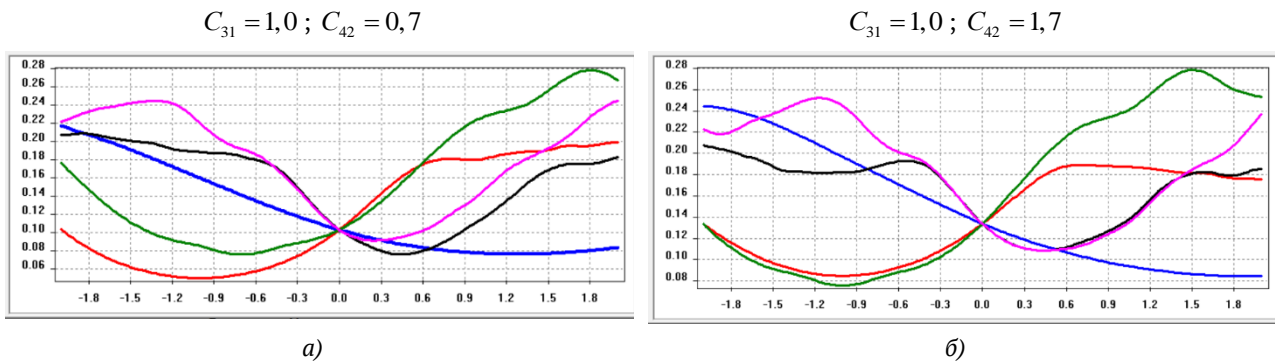


Рис.7. Графики зависимости момента $F[G(x, y)]$ (11) от величины D_{pq} и типа (p, q) добавленной aberrации к возмущённому входному полю $F_0(r, \varphi)$ с суперпозицией aberrаций $S_0(r, \varphi) = -C_{31}Z_{31} - C_{42}Z_{42}$: (а) – $C_{31} = 1.0$ и $C_{42} = 0.7$; (б) – $C_{31} = 1.0$ и $C_{42} = 1.0$; Обозначения типов aberrаций (p, q) : (2,2) – синим, (3,1) – красным, (4,2) – зелёным, (5,1) – чёрным, (6,2) – розовым

В ряде численных экспериментов определено (рис. 7а), что момент $F_{null}[G(x, y)] = 0.1$ для исходного поля $F_0(r, \varphi)$ с суперпозицией $S_0(r, \varphi) = -Z_{31} - 0.7Z_{42}$ достигает минимального значения $F_{min}[G(x, y)] = 0.05$ после добавления одной aberrации типа $(p, q) = (3, 1)$ с весовым коэффициентом $D_{pq} = -1.0$. Добавление aberrаций Z_{22} , Z_{42} , Z_{51} также позволяют снизить значение момента и достигнуть приблизительно одинаковые минимальные значения, но больше $F_{min}[G(x, y)] = 0.05$ более чем в 1.4 раз. Добавление aberrаций Z_{62} также позволяют снизить значение момента но больше $F_{min}[G(x, y)] = 0.05$ более чем в 1,8 раз.

Из распределения значений моментов для исходного поля $F_0(r, \varphi)$ с суперпозицией $S_0(r, \varphi) = -Z_{31} - Z_{42}$ видно (рис. 7б), что наименьшее значение $F_{min}[G(x, y)] = 0.07$ достигается за счёт добавления aberrации Z_{42} , которая входит в исходную суперпозицию $S_0(r, \varphi)$. Следующие aberrации с точки зрения эффективности уменьшения исходного момента $F_{null}[G(x, y)] = 0.13$ являются Z_{22} и Z_{31} . Они позволяют достигнуть приблизительно одинаковые значения моментов, которые больше минимума $F_{min}[G(x, y)] = 0.07$ в 1,2 раза.

Дополнение aberrаций типа Z_{51} или Z_{62} также позволяют снизить значение момента и достигнуть приблизительно одинаковые минимальные значения, но больше $F_{min}[G(x, y)] = 0.07$ более чем в 1,5 раза.

Таким образом, для поля, заданного суперпозицией из нескольких aberrации верно утверждение, что существует целый набор aberrаций, уменьшающих момент, но aberrация, уменьшающая момент наибольшим образом, входит в исходную суперпозицию. Стоит отметить, что в случае одиночной и суперпозицией aberrаций большое количество

компенсирующих aberrаций не уменьшают момент, а только увеличивают его. С ростом числа aberrаций в исходной суперпозиции число таких aberrаций уменьшается.

Заключение

Реализован метод моментов для алгоритмизации компенсации aberrаций на основе многоканального дифракционного оптического элемента, согласованного с базисом функций Цернике. В качестве функционала предложено использование второго центрального момента интенсивности фокального изображения. Проведено исследование второго центрального момента для случая одиночной aberrации или суперпозиции aberrаций. Получено, что для поля, заданного суперпозицией из нескольких aberrаций верно утверждение: «Существует целый набор aberrаций, уменьшающих момент, но aberrация, уменьшающая момент наибольшим образом, входит в исходную суперпозицию».

Разработан итерационный алгоритм для определения типа (p, q) и веса D_{pq} компенсирующей суперпозиции aberrаций $S_1(r, \varphi)$ на основе минимизации функционала $F_{\min N}[G(x, y)]$ на каждом шаге N . Критерием выхода из итерационного алгоритма является минимизация момента до эталонного $F_{\min}[G(x, y)]$, соответствующего безaberrационному полю или ситуация, когда ни одна aberrация из набора $\Omega(Z_{pq}, p \leq 7)$ не уменьшает момент.

Получено, что последовательное дополнение к компенсирующей суперпозиции aberrаций, наибольшим образом минимизирующих момент, позволяет решить задачу построения компенсирующей суперпозиции aberrаций из заранее заданного набора aberrаций.

Полученные результаты могут быть полезны при контроле качества формы оптических элементов, оценке погрешности при юстировке оптических систем, а также при проведении обследования на наличие и прогрессирование глазных заболеваний на ранних стадиях. Учитывая широкий диапазон корректно детектируемой величины aberrаций при помощи предложенного метода, основанного на согласовании фильтра с фазовыми функциями Цернике, областью применения может так же выступать измерение и коррекция aberrаций волнового фронта в системах оптической коммуникации и в промышленной лазерной технике.

Благодарность

Работа выполнена и опубликована за счет средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

Список источников

- [1] Lombardo M., Lombardo G., Serrao S. Interocular high-order corneal wavefront aberration symmetry // JOSA A. – 2006. – Т. 23. – №. 4. – С. 777-787.
- [2] Völkel R., Eisner M., Weible K. J. Miniaturized imaging systems // Microelectronic Engineering. – 2003. – Т. 67. – С. 461-472.
- [3] Camacho L. et al. Quantitative phase microscopy using defocusing by means of a spatial light modulator // Optics express. – 2010. – Т. 18. – №. 7. – С. 6755-6766.

- [4] Ellerbroek B. L., Vogel C. R. Inverse problems in astronomical adaptive optics // *Inverse Problems*. – 2009. – Т. 25. – №. 6. – С. 063001.
- [5] Thomas S. A simple turbulence simulator for adaptive optics // *Advancements in Adaptive Optics*. – SPIE, 2004. – Т. 5490. – С. 766-773.
- [6] Takeda M. Fourier fringe analysis and its application to metrology of extreme physical phenomena: a review // *Applied Optics*. – 2013. – Т. 52. – №. 1. – С. 20-29.
- [7] Platt B. C., Shack R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing // *Journal of refractive surgery*. – 2001. – Т. 17. – №. 5. – С. S573-S577.
- [8] Liang R., Erwin J. K., Mansuripur M. Variation on Zernike's phase-contrast microscope // *Applied optics*. – 2000. – Т. 39. – №. 13. – С. 2152-2158.
- [9] Rivenson Y. et al. Phase recovery and holographic image reconstruction using deep learning in neural networks // *Light: Science & Applications*. – 2018. – Т. 7. – №. 2. – С. 17141-17141.
- [10] Ha Y. et al. Diffractive optical element for Zernike decomposition // *Current Developments in Optical Elements and Manufacturing*. – SPIE, 1998. – Т. 3557. – С. 191-197.
- [11] Porfirev A. P., Khonina S. N. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions // *Optical Technologies for Telecommunications 2015*. – SPIE, 2016. – Т. 9807. – С. 106-114.
- [12] Born M., Wolf E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. – Elsevier, 2013.
- [13] Neil M. A. A., Booth M. J., Wilson T. New modal wave-front sensor: a theoretical analysis // *JOSA A*. – 2000. – Т. 17. – №. 6. – С. 1098-1107.
- [14] Khorin P. A., Volotovskiy S. G., Khonina S. N. Optical detection of values of separate aberrations using a multi-channel filter matched with phase Zernike functions // *Computer Optics*. – 2021. – Т. 45. – №. 4. – С. 525-533.
- [15] Венедиктов В. Ю. и др. Голографические датчики волнового фронта // *Квантовая электроника*. – 2020. – Т. 50. – №. 7. – С. 614-622.
- [16] Khorin P. A. Iterative algorithm for wavefront correction based on optical decomposition in wave aberrations // *2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. – IEEE, 2021. – С. 1-6.
- [17] Volotovskiy S. G., Karpeev S. V., Khonina S. N. Algorithm for reconstructing complex coefficients of Laguerre-Gaussian modes from the intensity distribution of their coherent superposition // *Computer Optics*. – 2020. – Т. 44. – №. 3. – С. 352-362. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-727.

The moment method application to wavefront aberrations compensation

P. A. Khorin^{1,2}, S. G. Volotovskiy², P. A. Vechkanova¹, S. N. Khonina^{1,2}

¹ Samara National Research University, Samara 443086, Russia

² Image Processing Systems Institute of RAS—Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara 443001, Russia.

The method of moments has been developed for the algorithmization of aberration compensation based on a diffractive optical element matched to the basis of Zernike functions. The use of the second central moment of the focal image intensity is proposed as a functional. The study of the second central moment for the superposition of aberrations has been carried out. It is found that the achievement of the reference value of the second moment can serve as a sign of the end of the aberration compensation.

Keywords: Wave aberrations, Method of moments, Compensation, Diffractive optics.

Синтез компьютерных голограмм для структурирования излучения при заведении в многосердцевинные оптические волокна

А. А. Ревякин^{1,2}, М. Д. Гервазиев^{1,2}, Д. С. Харенко^{1,2}, Н. В. Бочкарев^{1,2}, Н. А. Коляда^{1,2,3},
С. А. Бабин^{1,2}

¹ Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе представлен сравнительный анализ методов синтеза фазовых компьютерных голограмм в контексте задачи заведения излучения в многосердцевинные оптические волокна. Задача заведения подразумевает контроль параметров излучения на входе в каждую из сердцевин волокна без значительной потери мощности светового потока. Это может быть актуально для исследования эффектов временного сжатия и когерентного объединения импульсов, возникновение которых в многосердцевинных оптических волокнах предсказано численно. Рассмотрены методы синтеза компьютерных голограмм на основе метода двойных фаз, алгоритма Гершберга-Сакстона и алгоритма Гершберга-Сакстона с весами. Приведены погрешности воспроизведения заданных параметров излучения и эффективность для заведения при различных конфигурациях параметров излучения.

Ключевые слова: Фазовые компьютерные голограммы, Многосердцевинные оптические волокна, Алгоритм Гершберга-Сакстона, Метод двойных фаз.

Цитирование: Ревякин, А. А. Синтез компьютерных голограмм для структурирования излучения при заведении в многосердцевинные оптические волокна / А. А. Ревякин, М. Д. Гервазиев, Д. С. Харенко, Н. В. Бочкарев, Н. А. Коляда, С. А. Бабин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 99–102.

Введение

В настоящее время компьютерная голография получила широкое применение в различных областях прикладной и научной деятельности, таких как модовая декомпозиция [1], структурирование лазерных импульсов [2], создание массивов оптических ловушек [3] и других. Мы считаем, что использование компьютерных голограмм, полученных существующими методами, может обеспечить проведение экспериментов по исследованию численно предсказанных эффектов [4], возникающих в многосердцевинных оптических волокнах, для которых необходим ввод излучения большой мощности в каждую сердцевину. В контексте задачи контролируемого ввода излучения в сердцевину оптического волокна в работе был проведен сравнительный анализ трех рассмотренных далее методов генерации компьютерных голограмм.

1. Исследуемые методы

В работе проведен сравнительный анализ следующих методов: алгоритм Гершберга-Сакстона [5] (Gerchberg-Saxton, GS), алгоритм Гершберга-Сакстона с весами [6] (weighted

Gerchberg-Saxton, WGS), метод двойных фаз [7] (double-phase holograms, DPH). Модификация фазы поля происходит при отражении от экрана пространственного фазового модулятора света (spatial light modulator, SLM).

Хорошо известный алгоритм GS позволяет итеративно подобрать фазу поля в передней фокальной плоскости линзы, зная амплитуду поля в задней фокальной плоскости. Однако данный алгоритм требует большого числа итераций и подвержен попаданию в локальные минимумы функции ошибки.

В алгоритме WGS предполагается, что угловой спектр поля, отраженного от экрана SLM, является набором небольшого числа узких пиков с одинаковыми амплитудами. Это предположение приводит к тому, что голограмма в данном случае задается набором весовых коэффициентов и фазовых сдвигов, сводя к минимуму количество варьируемых параметров, в отличие от GS, где это количество соответствует числу пикселей экрана SLM. Корректировка этих коэффициентов в результате итераций алгоритма приводит к установлению оптимальных значений коэффициентов, отвечающих максимуму дифракционной эффективности. Кроме того, в данной работе алгоритм дополнительно модифицирован, что позволяет изменять амплитуды пиков.

Метод DPH основан на объединении пикселей экрана SLM в макропиксели (в данной работе с размером 2×2 пикселя), что позволяет имитировать амплитудно-фазовую модуляцию. Это приводит к получению голограммы без итераций, однако возникает сильная дифракция, приводящая к потере полезной мощности.

2. Установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Лазерный пучок (длина волны 1050 нм) коллимируется и расширяется с помощью системы линз L1, L2 до подходящего диаметра (около 8 мм), чтобы задействовать наибольшую площадь экрана SLM. Излучение, отраженное от экрана SLM (Meadowlark 1920 XY Series), проходит через фурье-линзу L3 и фокусируется на матрице камеры (Beamage-4M). Голограммы ϕ генерируются на ПК и записываются на SLM. Соответствующие им распределения интенсивности $|U_f|^2$ фиксируются камерой и сохраняются для последующей обработки.

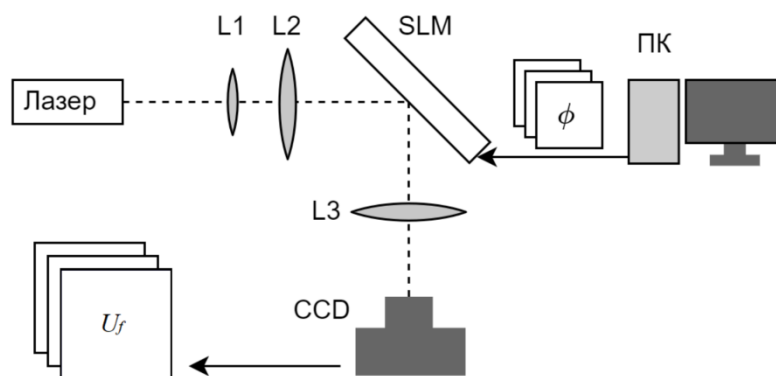


Рис. 1. Схема установки

При генерации голограмм в качестве параметров используются мощности, попадающие в сердцевину волокна. Они задаются как доли от общей мощности лазерного пучка: целевые T_m и измеренные экспериментально P_m .

3. Результаты

Для того чтобы сравнить методы по точности, был построен график зависимости квадратичной ошибки от стандартного отклонения σ набора T_m (рис. 2). Стандартное отклонение $\sigma(T_m)$ введено, чтобы характеризовать разброс значений целевой мощности. Из рис. 2 видно, что ошибка алгоритма GS на порядок больше ошибки алгоритма WGS при малом разбросе целевых мощностей, а также на порядок больше, чем ошибка метода DPH. Метод WGS имеет меньшую ошибку при малом разбросе целевых мощностей, DPH – при большом разбросе целевых мощностей. Кроме точности воспроизведения целевых мощностей, необходимо сохранить как можно большую долю излучения в полезном сигнале, так как возникающие в многосердцевинных оптических волокнах эффекты являются нелинейными. За полезную мощность была принята мощность того излучения, которое сформировало заданное распределение интенсивности в фокальной плоскости фурье-линзы. Для рассмотренных методов отношение полезной мощности к исходной составило $90 \pm 3 \%$ для алгоритма GS, $90 \pm 6 \%$ для алгоритма WGS и $35 \pm 2 \%$ для метода DPH.

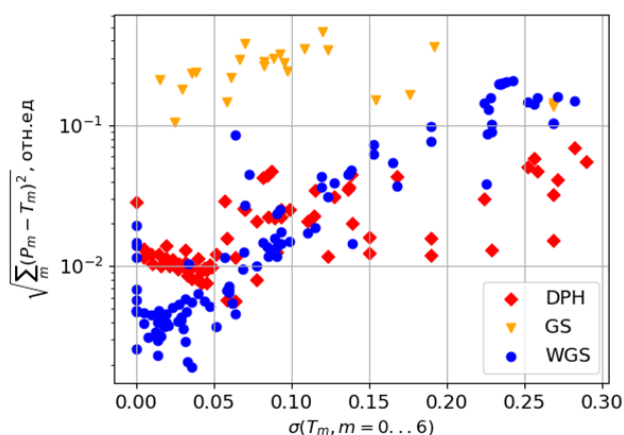


Рис. 2. Сравнение методов. Степень соответствия реальных P_m и заданных T_m в алгоритме мощностей, определенная как квадратичная ошибка в зависимости от разброса значений в целевом наборе интенсивностей.

Заключение

Продемонстрирована возможность использования компьютерных фазовых голограмм для заведения излучения с контролем его параметров в многосердцевинное оптическое волокно. Из сравнения алгоритмов GS и WGS следует необходимость перехода в данной задаче к алгоритмам с минимальным числом степеней свободы, таким как весовые коэффициенты и фазовые сдвиги в методе WGS. Кроме этого, так как задача заведения излучения в сердцевину волокна не подразумевает контроль параметров излучения во всей фокальной плоскости

фурье-линзы, то возможно использование таких методов как ДРН, где происходит контроль углового спектра поля только при малых отклонениях от оптической оси. Однако нужно учитывать, что в этом случае достижение большого отношения сигнал-шум происходит за счет сильных потерь, связанных с дифракцией.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (21-72-30024).

Список источников

- [1] **Flamm D.** Mode analysis with a spatial light modulator as a correlation filter / D. Flamm, D. Naidoo, C. Schulze // *Optics letters*. — 2012. — Vol. 37, № 13. — P. 2478–2480.
- [2] **Weiner A. M.** Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators // *Review of scientific instruments*. — 2000. — Vol. 71, № 5. — P. 1929–1960.
- [3] **Polin M.** Optimized holographic optical traps / M. Polin, K. Ladavac, S. Lee. // *Optics Express*. — 2005. — Vol. 13, № 15. — P. 5831–5845.
- [4] **Rubenchik A.** Nonlinear pulse combining and pulse compression in multi-core fibers / A. Rubenchik, I. Chekhovskoy, M. Fedoruk // *Optics letters*. — 2015. — Vol. 40, № 5. — P. 721–724.
- [5] **Gerchberg R.** Super-resolution through error energy reduction // *Optica Acta: International Journal of Optics*. — 1974. — Vol. 21, № 9. — P. 709–720.
- [6] **Di Leonardo R.** Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays / R. Di Leonardo, F. Ianni, G. Ruocco // *Optics Express*. — 2007. — Vol. 15, № 4. — P. 1913–1922.
- [7] **Hsueh C.** Computer-generated double-phase holograms / C. Hsueh, A. Sawchuk // *Applied optics*. — 1978. — Vol. 17, № 24. — P. 3874–3883.

Computer-generated holograms for structuring of beams inserted into multicore optical fibers

A. A. Revyakin^{1,2}, M. D. Gervaziev^{1,2}, D. S. Kharenko^{1,2}, N. V. Bochkarev^{1,2}, N. A. Kolyada^{1,2,3}, S. A. Babin^{1,2}

¹ Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³ Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The paper presents a comparative analysis of only-phase computer generated holograms (CGH) computation methods to solve a problem of inputting radiation into multi-core optical fibers. The problem is to control the radiation parameters at the entrance to each fiber core without significant luminous flux power loss. This may be relevant for studying the effects of temporal compression and coherent laser pulses combining, that are predicted numerically. CGH generating methods based on the double-phase holograms, the Gerchberg-Saxton and the weighted Gerchberg-Saxton algorithms are considered. The specified radiation parameters reproduction errors and the inputting efficiency for different radiation parameters configurations are given.

Keywords: Only-phase computer generated holograms, Multi-core optical fibers, Gerchberg-Saxton algorithm, Double-phase holograms.

Метод модовой декомпозиции на основе пространственной фазовой модуляции: генерация компьютерных голограмм и обработка результатов

М. Д. Гервазиев^{1,2}, Д. С. Харенко^{1,2}, К. В. Серебренников², Е. В. Подивилов^{1,2}, Ф. Манджини³,
М. Ферраро³, М. Дзителли³, С. Вабниц³, С. А. Бабин^{1,2}

¹ Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Университет Ла Сапиенца, Рим, Италия

Активные исследования ММ волокон с начала века привели к открытию ряда нетривиальных нелинейных эффектов таких, как керровская самоочистка пучка, чистка пучка на основе вынужденного комбинационного рассеяния, многомодовые пространственно-временные солитоны и т.д. Технологии и элементы на основе данных эффектов могут найти применение в таких областях, как многофотонная микроскопия, лазерная оптика, оптические транзисторы и пинцеты. Однако, сложная динамика множества поперечных мод требует новых способов характеристики излучения. Модовая декомпозиция на основе цифровой голографии хорошо зарекомендовывает себя в качестве такого метода. В данном докладе демонстрируются принципы работы метода, а также показан пример его применения для исследования термализации вихревых пучков в градиентном световоде.

Ключевые слова: Нелинейная волоконная оптика, модовая декомпозиция, пространственный модулятор света, цифровая голография.

Цитирование: Гервазиев, М. Д. Метод модовой декомпозиции на основе пространственной фазовой модуляции: генерация компьютерных голограмм и обработка результатов / М. Д. Гервазиев, Д. С. Харенко, К. В. Серебренников, Е. В. Подивилов, Ф. Манджини, М. Ферраро, М. Дзителли, С. Вабниц, С. А. Бабин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 103–106.

Введение

В последнее время неуклонно растёт интерес к методам полной модовой декомпозиции (МД). Благодаря тому факту, что МД даёт полную информацию о поле, метод является актуальным, например, для изучения динамики качества пучка в лазерных резонаторах [1] и структуры орбитального углового момента [2]. Параллельно с этим возродился интерес к исследованиям многомодовых (ММ) волокон после недавнего открытия новых и интригующих нелинейных эффектов в волокне с градиентным профилем показателя преломления (graded-index, GRIN). Примерами таких эффектов являются керровская самоочистка пучка [3] и генерация суперконтинуума с высокой импульсной мощностью и спектральной яркостью, которые позволяют восстановить качество входного лазерного пучка на выходе волокна, несмотря на большое количество распространяющихся поперечных мод [4]. Добавление пространственной степени свободы требует модифицированных методов анализа излучения, и МД прекрасно для этого подходит. В недавних исследованиях с помощью МД были исследованы керровская самоочистка [5], а также пространственная чистка пучка на основе

вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [6]. Целью данной работы является исследование особенностей метода модовой декомпозиции, а также применение метода к пучкам, обладающим ненулевым орбитальным угловым моментом (orbital angular momentum, OAM).

1. Экспериментальные методы

Базисом для GRIN MM волокна является набор ортонормированных Гаусс-Лаггеровских (Laguerre-Gauss, LG) мод. Ортонормированность базиса подразумевает, что определение амплитуды моды требует вычисления её скалярного произведения с полем. Экспериментально это сводится к модуляции поля с помощью дифракционного оптического элемента с функцией пропускания, пропорциональной комплексно сопряженной моде. Пространственный модулятор света (spatial light modulator, SLM) позволяет в реальном времени менять функцию пропускания для каждой моды. Однако, коммерчески-доступные SLM эффективно накладывают только фазовую модуляцию. Эта проблема решается с помощью разложения Якоби-Ангера, теоремы о свертке и равенства Парсеваля. Вычисляются компьютерные голограммы, позволяющие определять относительный модовый вклад, измеряя интенсивность в определенной точке фокальной плоскости линзы. Аналогичным способом, с помощью двух голограмм определяется межмодовая интерференция, откуда вычисляется значение фазы моды относительно фундаментальной. Обладая информацией об амплитудах и фазах, можно восстановить пучок для сравнения с исходным, что дает представление о корректности проведенной МД.

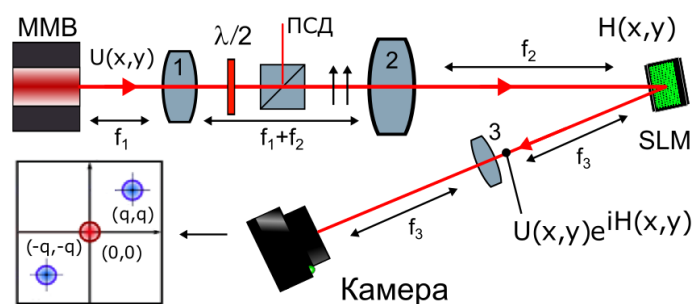


Рис. 1. Экспериментальная установка. $U(x,y)$ – поле, $H(x,y)$ – фазовая маска.

На рис. 1 продемонстрирована экспериментальная установка для проведения МД. Линзы 1 и 2 позволяют коллимировать и увеличить пучок на SLM, увеличивая тем самым эффективное разрешение модулятора. Так как SLM работает только с горизонтальной поляризацией, на выходе из волокна размещается поляризационный светоделитель (ПСД). В фокальной плоскости размещается камера для измерения интенсивности в центре корреляционного отклика.

Несмотря на то, что метод уже позволил получить некоторые значительные результаты [4,5], весь его потенциал всё ещё остаётся не раскрыт. Например, требует повышения точность восстановления фаз. На величину ошибки может влиять уровень шума

на камере, и на данный момент исследований этой проблемы не проводилось. Поведение фаз вызывает особый интерес в контексте упомянутых выше нелинейных эффектов, в которых ожидается синхронизация фаз поперечных мод. Также на данный момент отсутствует количественный показатель схожести исходного и восстановленного пучков – все сравнения носят качественный характер. Однако, даже без описанных усовершенствований МД может быть успешно применена для актуальной задачи определения модового состава пучков, обладающих ненулевым ОАМ и измерения его полного значения.

2. Результаты и обсуждения

Результаты измерений приведены на рис. 2. Продемонстрированы распределения мод в случае положительного (рис. 2 (а)) и отрицательного (рис. 2(б)) значений ОАМ для двух значений мощности. На вставках исходный пучок расположен слева, восстановленный справа. Качественно пучки обладают сходством, а распределение мод в случае высокой мощности приближается к теоретически ожидаемому (обозначенно голубыми точками) обобщенному распределению Рэля-Джинса (RJ), что соответствует установлению теплового равновесия излучения. При этом экспериментально продемонстрировано, что при термализации сохраняются значения продольной компоненты полного импульса, а также значение ОАМ, что также предсказывалось теорией. Экспериментальные значения совпадают с теоретическими.

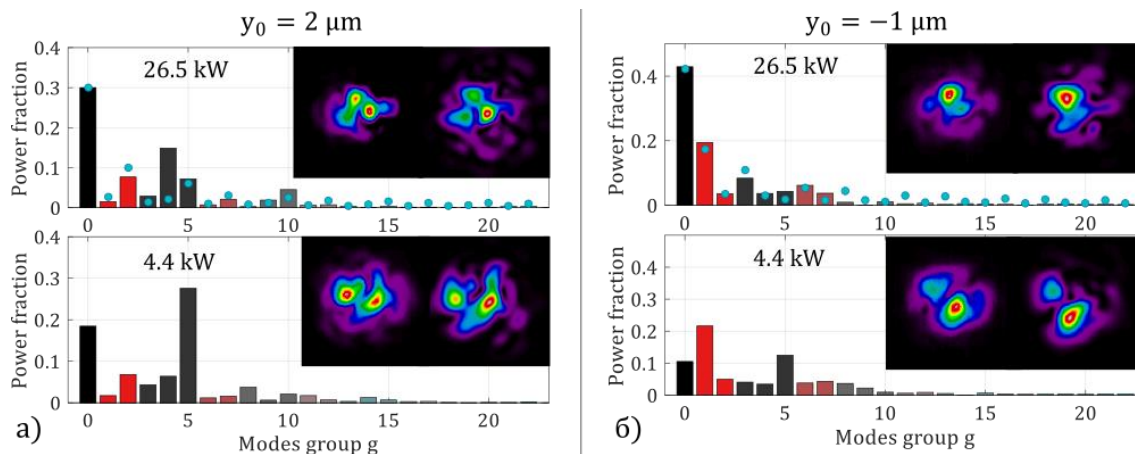


Рис. 2. Распределения мод излучения для двух различных условий заведения, а) – соответствует положительному значению ОАМ, б) – отрицательному. [7]

Заключение

Таким образом, экспериментально определены параметры, сохраняющиеся при повышении мощности излучения, что вкупе с распределением мод близким к RJ указывает на установление теплового равновесия. Результаты получены с помощью метода МД, увеличение точности и скорости которого позволит наблюдать и более тонкие нелинейные эффекты в ММ волокнах.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (21-72-30024).

Список источников

- [1] **Schmidt, O. A.** Real-time determination of laser beam quality by modal decomposition / C. Schulze, D. Flamm, R. Brüning, T. Kaiser, S. Schröter, M. Duparré // *Optics express*. – 2011. – Vol. 19. – №. 7. – P. 6741-6748.
- [2] **Litvin, I. A.** Poynting vector and orbital angular momentum density of superpositions of Bessel beams / A. Dudley, A. Forbes // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19. – №. 18. – P. 16760-16771.
- [3] **Krupa, K.** Spatial beam self-cleaning in multimode fibres / A. Tonello, B. M. Shalaby, M. Fabert, A. Barthélémy, G. Millot, S. Wabnitz, V. Couderc // *Nature Photonics*. – 2017. – Vol. 11. – №. 4. – P. 237-241.
- [4] **Niang, A.** Spatial beam self-cleaning and supercontinuum generation with Yb-doped multimode graded-index fiber taper based on accelerating self-imaging and dissipative landscape / T. Mansuryan et al. // *Optics express*. – 2019. – Vol. 27. – №. 17. – P. 24018-24028.
- [5] **Mangini, F.** Statistical mechanics of beam self-cleaning in GRIN multimode optical fibers / M. Gervaziev, M. Ferraro, D. S. Kharenko, M. Zitelli, Y. Sun, V. Couderc, E. V. Podivilov, S. A. Babin, S. Wabnitz // *Optics Express*. – 2022. – Vol. 30. – №. 7. – P. 10850-10865.
- [6] **Kharenko, D. S.** Mode-resolved analysis of pump and Stokes beams in LD-pumped GRIN fiber Raman lasers / M. D. Gervaziev, A. G. Kuznetsov, E. V. Podivilov, S. Wabnitz, and S. A. Babin // *Optics Letters*. – 2022. – Vol. 47. – №. 5. – P. 1222-1225.
- [7] **Podivilov, E. V.** Thermalization of orbital angular momentum beams in multimode optical fibers / F. Mangini, O. S. Sidelnikov, M. Ferraro, M. Gervaziev, D. S. Kharenko, M. Zitelli, M. P. Fedoruk, S. A. Babin, and S. Wabnitz // *Physical Review Letters*. – 2022. – Vol. 128. – №. 24. – P. 243901.

Mode decomposition method based on spatial phase modulation: digital hologram generation and results processing

M. D. Gervaziev^{1,2}, D. S. Kharenko^{1,2}, K. V. Serebrennikov², E. V. Podivilov^{1,2}, F. Mangini³, M. Ferraro³, M. Zitelli³, S. Wabnitz³, S. A. Babin^{1,2}

¹ Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³ Sapienza University of Rome, Rome, Italy

Active research of multimode fibers since the beginning of the century has led to discovery of several nontrivial nonlinear effects (Kerr beam self-cleaning, Raman beam cleaning, multimode spatiotemporal solitons, etc). Technologies based on these effects can find applications in different fields: multiphoton microscopy, laser optics, optical switching and tweezers. However, the complex dynamics of multiple transverse modes requires new ways to characterize the radiation. Mode decomposition based on computer holography is well established as such method. This paper demonstrates the principles of method and shows an example of its application to study thermalization of vortex beams in graded-index waveguide.

Keywords: Nonlinear fiber optics, Mode decomposition, Spatial light modulator, Computer holography.

Многослойные интерференционные метаматериалы для субдискретизации и антиалиасной фильтрации в оптической терагерцовой спектроскопии

Н. А. Николаев^{1,2}, А. А. Рыбак^{1,2}, С. А. Кузнецов^{1,3}

¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

² Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

³ Филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук «КТИПМ», Новосибирск, Россия

В работе представлен дизайн узкополосных и низкочастотных квазиоптических терагерцовых (ТГц) фильтров, основанный на интерференционной многослойной структуре из метаповерхностей. Предложена и апробирована концепция, антиалиасной фильтрации и субдискретизации, для реализации которых ключевыми элементами являются низкочастотные и узкополосные фильтры соответственно. Оба подхода основаны на увеличении интервала выборки в соответствии с теоремой отсчетов при дискретизации волновой формы амплитуды ТГц поля. Апробация предложенной концепции в эксперименте показала выигрыш во времени измерения сигнала и снижение его шумов.

Ключевые слова: квазиоптические микроструктуры, фильтр низких частот, полосовой фильтр, терагерцовый диапазон, субдискретизация, антиалиасная фильтрация.

Цитирование: Николаев, Н. А. Многослойные интерференционные метаматериалы для субдискретизации и антиалиасной фильтрации в оптической терагерцовой спектроскопии / Н. А. Николаев, А. А. Рыбак, С. А. Кузнецов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 107–109.

Введение

В настоящее время системы импульсной терагерцовой (ТГц) спектроскопии (ИТС) находят свое применение для решения ряда медицинских и промышленных задач: ранняя диагностика кожных заболеваний, включая меланому, и синдрома диабетической стопы [1]; диагностика глиобластомы головного мозга [2]; бесконтактная диагностика качества диэлектрических покрытий и полимерных изделий [3]. Многие приложения требуют визуализации исследуемого объекта. Поскольку в настоящее время отсутствуют чувствительные матричные детекторы данного диапазона, и средняя мощность генераторов в ИТС составляет < 1 мкВт, визуализация в основном строится на поточечном двумерном картировании, требующем значительного времени. В этой связи актуальными являются методы сокращения времени измерения спектрометров.

Система регистрации ИТС основана на дискретизации амплитуды терагерцового поля в временной области. Для детектирования без потери информации, должна удовлетворяться теорема отсчетов Уиттекера-Котельникова-Шеннона. Несмотря на то, что современные ИТС охватывают диапазон частот от 50 ГГц до 6 ТГц, в ряде задач информативной является лишь

малая область спектра, в то время как в согласии с теоремой отсчетов требуется сохранять частоту выборки не менее 12 ТГц, поскольку нормировочный сигнал несет в себе всю полосу. При этом, из вышеперечисленных приложений, почти все могут быть реализованы с помощью спектрально ограниченных сигналов. Маркеры глиомы имеют характерные различия в диапазоне 1,2–1,8 ТГц; в промышленных задачах применение частот > 1,6 ТГц часто лишено смысла, из-за их сильного поглощения атмосферой; используемый для визуализации опухолей диапазон лежит ниже 1 ТГц. В этой связи, применение соответствующих квазиоптических фильтров низких частот (ФНЧ) с высоким внеполосовым подавлением сигнала поможет повысить скорость сбора данных при снижении частоты дискретизации в ИТС.

Ключевые результаты

Предложен подход, основанный на применении емкостных субволновых микроструктур в качестве антиалиасных (anti-aliasing) фильтров в ИТС. Тестирование проведено при измерении спектров пропускающих полосовых фильтров с центральными частотами 156 и 376 ГГц и шириной полосы ~12%. Показано уменьшение времени измерения спектрометра до 12 раз при сохранении точности измерений.

Предложен и разработан дизайн узкополосного фильтра, основанный на эталоне Фабри-Перо с сеточными рефлекторами, совмещенного с широкополосным полосовым пропускающим фильтром, подавляющим высшие резонансы эталона. На примере исследования пропускания кремниевой пластины в окрестности частоты 0,85 ТГц экспериментально реализован метод субдискретизации в ИТС, сокращающий время измерения в 2 раза.

С применением предложенной техники исследована комплексная диэлектрическая проницаемость кристаллов КТП и SBN в субтерагерцовой области спектра.

Заключение

Предложенные подходы, основанные на антиалиасной фильтрации с последующим увеличением шага дискретизации и полосовой фильтрации с применением субдискретизации, позволяют сократить время измерения сигналов в ИТС при исследовании сред в ограниченной частотной области. Это может помочь повысить скорость систем терагерцовой визуализации, построенных на базе ИТС.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РФФИ проект № 20-32-90137, а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проектов № FSUS-2020-0029 НГУ и Госзадания ИАиЭ СО РАН.

Авторы выражают благодарность ЦКП «ВТАН» НГУ, поддержанному Минобрнауки РФ (соглаш. №075-12-2021-697) и ЦКП «Спектроскопия и Оптика» ИАиЭ СО РАН за предоставленное оборудование.

Список литературы

- [1] **Nikitkina, A. I.** Terahertz radiation and the skin: a review/ P. Y. Bikmulina, E. R. Gafarova, N. V. Kosheleva // Journal of Biomedical Optics. — 2021. — Vol. 26. — № 4. — P. 043005.
- [2] **Cherkasova, O.** Diagnosis of glioma molecular markers by terahertz technologies/ Y. Peng, M. Konnikova, Yu. Kistenev et al. // Photonics. — 2021. — Vol. 8. — № 1. — P. 22.
- [3] **Naftaly, M.** Industrial applications of terahertz sensing: State of play/ N. Vieweg, A. Deninger // Sensors. — 2019. — Vol. 19. — № 19. — P. 4203.

Multilayer interference-based metamaterials for undersampling and antialiasing filtration in terahertz time-domain spectroscopy

N. A. Nikolaev^{1,2}, A. A. Rybak^{1,2}, S. A. Kuznetsov^{1,3},

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

² Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

³ Division of the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics “TDIAM”, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The design of narrow-band and low-pass quasi-optical terahertz (THz) filters based on an interference multilayer structure of metasurfaces is presented. A concept based on the adaptation of analog-to-digital conversion techniques in optical terahertz spectroscopy is proposed and tested, namely antialiasing filtering and undersampling. The above-described filters are the key elements for the implementation of the proposed approaches, which are based on increasing the sampling interval in accordance with the Whittaker-Kotelnikov-Shannon theorem when detecting the waveform of the optical THz field after filtering. The approbation of the proposed concept in experimental measurements showed a significant reduction in data acquisition time and a reduction in signal noise.

Keywords: Quasi-optical microstructures, Low-pass filter, Band-pass filter, Terahertz range, undersampling, Antialias filter.

Способ усиления флуоресценции GFP в микрорезонаторе Фабри-Перо под действием фемтосекундных лазерных импульсов

С. А. Вьюнышева¹, С. А. Мысливец^{1,2}, Н. Н. Давлетшин^{1,2}, Е. В. Еремеева³, Е. С. Высоцкий³,
И. Н. Павлов⁴, А. М. Вьюнышев^{1,2}

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³Институт биофизики, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

⁴Институт леса им. В.Н. Сукачева, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

Приведены результаты экспериментального исследования усиления лазерно-индуцированной флуоресценции *sgreGFP* в микрорезонаторе Фабри-Перо под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Показано, что возбуждение белкового раствора фемтосекундным излучением приводит к усилению флуоресцентного сигнала на два порядка на спектральных частотах, соответствующих модам резонатора. Техники лазерно-индуцированной флуоресценции могут привести к разработке новых методов высококонтрастной микроскопии и получения гиперспектральных изображений в биомедицинских приложениях.

Ключевые слова: Флуоресценция, Зеленый флуоресцентный белок, Микрорезонатор Фабри-Перо, Фемтосекундные лазерные импульсы.

Цитирование: Вьюнышева, С. А. Способ усиления флуоресценции GFP в микрорезонаторе Фабри-Перо под действием фемтосекундных лазерных импульсов / С. А. Вьюнышева, С. А. Мысливец, Н. Н. Давлетшин, Е. В. Еремеева, Е. С. Высоцкий, И. Н. Павлов, А. М. Вьюнышев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 110–112.

Последние десятилетия ознаменовались всесторонним развитием эффективных методов визуализации, основанных на явлении флуоресценции. Широкое распространение флуоресцентных методов микроскопического анализа обусловлено совместимостью с живыми организмами, быстротой отклика и высокой чувствительностью метода [1,2]. Актуальной задачей биоимиджинга является исследование тканевых и клеточных структур биологических объектов со слабыми люминесцентными свойствами. В связи с этим, представляют интерес методики лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), позволяющие повысить полезный сигнал с помощью селективного возбуждения флуорофора. Разработка микроскопических методов анализа, основанных на лазерно-индуцированной флуоресценции, ведет к повышению контрастности изображения за счет увеличения отношения сигнал/шум.

В нашей работе усиление сигнала флуоресценции достигалось путем помещения раствора *sgreGFP* в микрорезонатор типа Фабри-Перо, состоящий из двух плоскопараллельных многослойных диэлектрических зеркал с фотоннозапрещенной зоной в диапазоне 450–620 нм. Возбуждение флуорофора осуществлялось второй гармоникой титан-

сапфирового лазера на длине волны 400 нм (80 МГц, 100 фс) по схеме, представленной на Рис.1. Средняя мощность варьировалась в пределах 1-30 мВт.

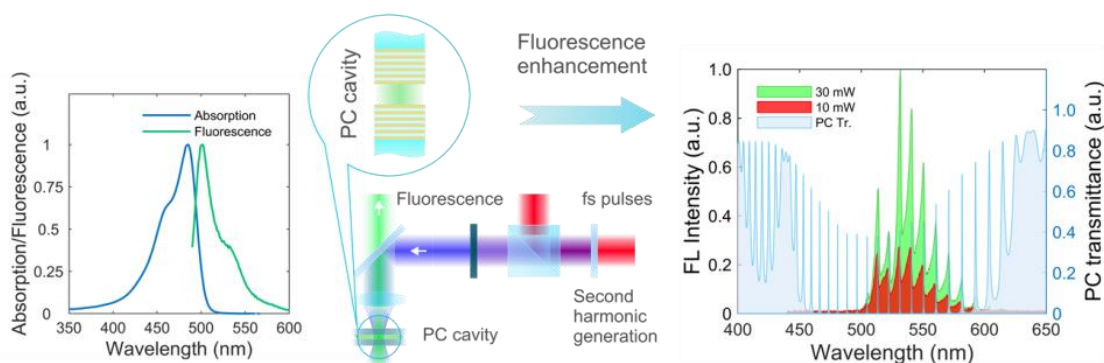


Рис. 1. Блок-схема эксперимента по усилению ЛИФ cgreGFP

Спектр флуоресценции cgreGFP в микрорезонаторе при различных мощностях падающего излучения имеет пиковую структуру (Рис.1), что свидетельствует об усилении сигнала флуоресценции на спектральных частотах, соответствующих микрорезонаторным модам. Нами предпринята попытка количественной оценки усиления флуоресценции cgreGFP по величине полуширины пика на полувысоте [3]:

$$Q = \lambda / \Delta\lambda,$$

где Q – добротность микрорезонатора; λ – длина волны; $\Delta\lambda$ – полуширина пика на полувысоте. На длине волны 530 нм ширина пика на полувысоте составляет 3 нм, что соответствует добротности микрорезонатора ≈ 177 . Таким образом, можно заключить, что усиление флуоресцентного сигнала достигает по величине двух порядков на длине волны 530 нм.

В работе продемонстрирована возможность усиления флуоресценции cgreGFP в микрорезонаторе под действием фемтосекундного лазерного излучения. Полученные результаты представляют интерес для развития существующих микроскопических методов анализа в биомедицинских приложениях.

Список источников

- [1] Li Q., Wu S. S. H., Chou K. C. Subdiffraction-limit two-photon fluorescence microscopy for GFP-tagged cell imaging // Biophysical journal. – 2009. – Т. 97. – №. 12. – С. 3224-3228.
- [2] Neumüller R. A. et al. Stringent analysis of gene function and protein–protein interactions using fluorescently tagged genes // Genetics. – 2012. – Т. 190. – №. 3. – С. 931-940.
- [3] Maitland A., Dunn M. H. Laser Physics // North-Holland Pub. Amsterdam. – 1969.

Method for enhancing GFP fluorescence in Fabry-Perot microcavity under femtosecond laser pulses

S. A. Vyunisheva¹, S.A. Myslivets^{1,2}, N.N. Davletshin^{1,2}, E.V. Eremeeva⁵, E.S. Vysotski³, I.N. Pavlov⁴,

A.M. Vyunishev^{1,2}

¹Kirensky Institute of Physics, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³Institute of Biophysics, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

⁴Sukachev Forestry Institute, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

The results of an experimental study of the enhancement of laser-induced cgreGFP fluorescence in Fabry-Perot microcavity under femtosecond laser pulses are presented. The excitation of a protein solution by femtosecond radiation is shown to lead to an increase in the fluorescent signal by two orders of magnitude at spectral frequencies corresponding to the cavity modes. Laser-induced fluorescence techniques are likely to result in the development of new methods for high-contrast microscopy and hyperspectral imaging in biomedical applications.

Keywords: Fluorescence, Green fluorescent protein, Fabry-Perot microcavity, Femtosecond laser pulses.

Пространственный контроль и структурирование света в нелинейной фотонике

А. М. Вьюнышев^{1,2}, В. Г. Архипкин^{1,2}, А. С. Чиркин^{1,5}

¹ Институт физики им. Л. В. Киренского, ФИЦ КНИЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Развита теория генерации второй гармоники фемтосекундных лазерных импульсов в 3D периодических нелинейных фотонных кристаллах. Получено выражение для спектральной интенсивности второй гармоники для спектрально-ограниченных и chirпированных фемтосекундных лазерных импульсов. Показана возможность нелинейного мультиплексирования генерируемого излучения и формирования дискретного углового спектра генерируемого излучения. Продемонстрирована роль дисперсии групповых скоростей в формировании частотно-углового спектра генерируемого излучения.

Ключевые слова: Нелинейные фотонные кристаллы, Генерация второй гармоники, Фемтосекундные лазерные импульсы.

Цитирование: Вьюнышев, А. М. Пространственный контроль и структурирование света в нелинейной фотонике / А. М. Вьюнышев, В. Г. Архипкин, А. С. Чиркин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 113–114.

Благодаря возможности пространственной модуляции знака квадратичной нелинейной восприимчивости $\chi^{(2)}$, нелинейные среды представляют собой идеальный объект для развития голографических (дифракционных) методов управления светом на частотах, отличных от частоты падающего лазерного излучения. Такие среды часто называют нелинейными фотонными кристаллами (НФК). Развитие в последние годы методов структурирования на основе непосредственной лазерной записи (англ. – direct laser writing) с помощью сверхкоротких лазерных импульсов позволило преодолеть ограничения, характерные для стандартного метода переполаризации внешним электрическим полем (англ. – electric field poling) и освоить третье пространственное измерение для получения трехмерных (3D) НФК. 3D НФК дают возможность управления пространственным спектром генерируемого излучения [1] и получения 2D структурированного света [2] за счет многообразия возможных нелинейно-оптических взаимодействий в них. Актуальной задачей является рассмотрение процесса удвоения частоты фемтосекундных лазерных импульсов, которые весьма востребованы в области ультрабыстрой фотоники и оптических коммуникациях.

В настоящем докладе приводятся результаты теоретического рассмотрения процесса генерации второй гармоники (ГВГ) фемтосекундных лазерных импульсов в периодических 3D НФК. Показана возможность нелинейного мультиплексирования генерируемого излучения, то есть получения ГВГ в режиме нелинейной дифракции Брэгга для набора порядков нелинейной дифракции. Продемонстрирована роль дисперсии групповых

скоростей в формировании частотно-углового спектра генерируемого излучения. Получено выражение для спектральной ширины генерируемого излучения с учетом расстройки обратных групповых скоростей.

3D НФК открывают новые возможности для нелинейно-оптического преобразования частоты света и нелинейного структурирования света и могут быть востребованы при реализации нелинейных параметрических взаимодействий.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-12-00203.

Список источников

- [1] **Xu, T.** Three-dimensional nonlinear photonic crystal in ferroelectric barium calcium titanate / T. Xu, K. Switkowski, X. Chen, S. Liu, K. Koynov, H. Yu, H. Zhang, J. Wang, Y. Sheng, W. Krolikowski // *Nature Photonics*. — 2018. — Vol 12. — P. 591–595.
- [2] **Liu, S.** Nonlinear wavefront shaping with optically induced three-dimensional nonlinear photonic crystals / S. Liu, K. Switkowski, C. Xu, J. Tian, B. Wang, P. Lu, W. Krolikowski, Y. Sheng // *Nature Communications*. — 2019. — Vol 10. — P. 3208.

Spatial control and structuring light in nonlinear photonics

A. M. Vyunishev^{1,2}, V. G. Arkhipkin^{1,2}, A. S. Chirkin^{1,3}

¹ Kirensky Institute of Physics, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The theory of second harmonic generation of femtosecond laser pulses in three-dimensional periodic nonlinear photonic crystals is developed. The expression for spectral intensity of the second harmonic for transform-limited and chirped femtosecond laser pulses is obtained. Possibility of nonlinear multiplexing and discrete angular spectrum formation has been demonstrated. The role of group velocity mismatch in formation of frequency-angular spectra of generated radiation is shown.

Keywords: Nonlinear photonic crystals, Second harmonic generation, Femtosecond laser pulses.

Структурированный свет для лазерной обработки тонких азополимерных пленок

А. П. Порфирьев, С. Н. Хонина, Н. А. Ивлиев, Д. П. Порфирьев

Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»
РАН, Самара, Россия

Мы представляем ряд примеров использования структурированных лазерных пучков для лазерной обработки тонких азополимерных пленок. Данный материал хорошо известен из-за его чувствительности к поляризации падающего излучения. Недавно были продемонстрированы уникальные возможности обработки таких материалов структурированным лазерным излучением с заданными распределениями амплитуды и поляризации. В данной работе представлены как численные, так и экспериментальные результаты, демонстрирующие возможности управления профилями формируемых микроструктур.

Ключевые слова: Структурированный свет, Азополимеры, Поляризация, Оптические вихри, Цилиндрические векторные пучки.

Цитирование: Порфирьев, А. П. Структурированный свет для лазерной обработки тонких азополимерных пленок / А. П. Порфирьев, С. Н. Хонина, Н. А. Ивлиев, Д. П. Порфирьев // NOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 115–118.

Введение

В последние годы для лазерной обработки материалов все чаще используются так называемые структурированные лазерные пучки со сложным распределением амплитуды, фазы и/или поляризации [1-5]. Эти лазерные пучки позволяют управлять морфологией структур, образующихся как на поверхности, так и в объеме различных материалов, как на нано-, так и на микроуровне. Структурированное по амплитуде и поляризации лазерное излучение активно используется при обработке поляризационно-чувствительных материалов – например, различных азополимеров [6]. Азополимеры являются перспективными оптически чувствительными материалами для динамических систем оптического преобразования и передачи сигналов, регистрации и хранения информации [7-9]. В данной работе представлены методы прямой лазерной обработки тонких пленок азополимеров на основе карбазола 9-(2,3-эпоксипропил)карбазола (ЭПК) и азокрасителя Disperse Orange 3 (DO3) и создания различных двух- и трехмерных микроструктур с использованием структурированных лазерных пучков и их суперпозиций. Продемонстрированные результаты показывают высокий потенциал использования структурированного лазерного луча для лазерной обработки поляризационно-чувствительных материалов и реализации высокопроизводительного изготовления дифракционных оптических элементов и метаповерхностей.

1. Обработка тонких пленок азоплимеров цилиндрическими векторными пучками высоких порядков

Для реализации прямой лазерной обработки тонких пленок карбазолсодержащих азополимеров с использованием структурированного лазерного излучения была использована оптическая схема на основе отражательного пространственного модулятора света (ПМС) HOLOEYE PLUTO VIS (см. рис. 1). Модулятор использовался для реализации фазовых масок дифракционных оптических элементов, формирующих заданные амплитудно-фазовые распределения. Для контроля поляризационного состояния формируемых лазерных пучков и преобразования линейной поляризации выходного лазерного излучения в круговую/эллиптическую поляризацию или цилиндрическую поляризацию высокого порядка использовались четвертьволновые пластины и q -пластинки первого и второго порядка, а также их комбинации (отмечены как элемент PE). Атомно-силовой микроскоп (АСМ) использовался для анализа профилей всех изготовленных микроструктур.

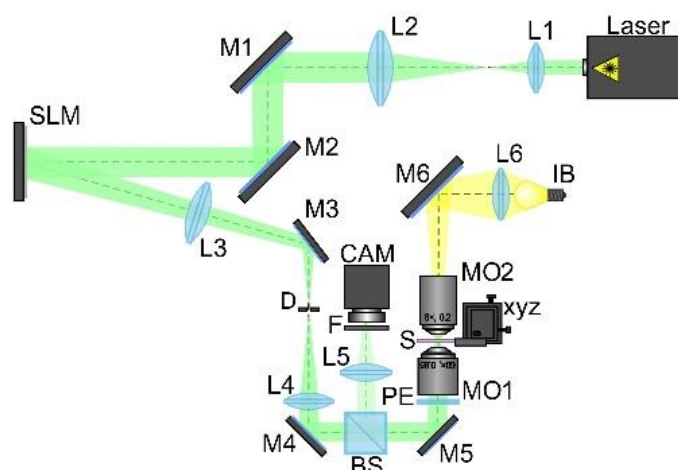


Рис. 1. Оптическая установка для лазерной обработки тонких азополимерных пленок

ЦВП представляют собой лазерные пучки с азимутальной симметрией не только в структуре поляризации, но в структуре поперечной интенсивности, сохраняющейся даже при фокусировке [10, 11]. Общая интенсивность сфокусированных ЦВП высоких порядков с учетом продольной составляющей электрического поля имеет некольцевую форму (см. рис. 2), что предсказывает формирование сложных микроструктур. В случае использования ЦВП для лазерной обработки тонких азополимерных пленок изготавливаемые микроструктуры представляют собой наборы чередующихся углублений и выступов, расположенных по окружности. Количество углублений и выступов равно количеству световых максимумов в распределении интенсивности продольной компоненты сфокусированного светового поля.

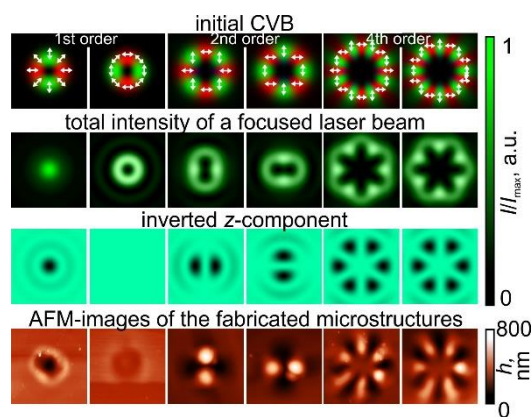


Рис. 2. Структурирование тонких азополимерных пленок с помощью ЦВП высоких порядков

2. Формирование мультиспиральных микроструктур

Хорошо известно, что соосная интерференция оптического вихревого пучка с топологическим зарядом m с Гауссовым пучком со сферическим волновым фронтом [12] приводит к формированию m -спирального распределения интенсивности. В данной работе мы использовали такие распределения интенсивности для обработки тонких азополимерных пленок и изготовления мультиспиральных микроструктур (см. рис. 3). Количество образующихся спиралей на поверхности используемых азополимерных тонких пленок и количество световых спиралей формируемых интерференционных картин, использованных для обработки, совпадают. Высота микроструктур находится в пределах от 150 нм в случае 5-спирального микрорельефа до 850 нм в случае 1-спирального микрорельефа.

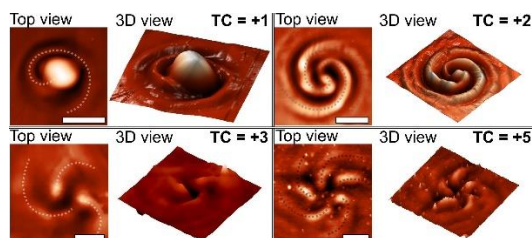


Рис. 3. Различные изготовленные мультиспиральные микроструктуры. Масштабная линейка 10 мкм

Заключение

Мы продемонстрировали несколько примеров использования структурированных лазерных пучков для лазерной обработки тонких азополимерных пленок на основе 9-(2,3-эпоксипропил)карбазол (ЭПК) и азокрасителя Disperse Orange 3 (DO3). Примеры включают двух- и трехмерные микроструктуры, которые можно использовать для формирования структурированного света (например, оптических вихревых лучей) на микроуровне.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-10007).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Völl, A.** Application specific intensity distributions for laser materials processing: tailoring the induced temperature profile / A. Völl, S. Vogt, R. Wester, J. Stollenwerk, P. Loosen // *Optics & Laser Technology*. – 2018. – Vol. 108. – P. 583-591.
- [2] **Porfirev, A.** Light–matter interaction empowered by orbital angular momentum: control of matter at the micro-and nanoscale / A. Porfirev, S. Khonina, A. Kuchmizhak // *Progress in Quantum Electronics*. – 2023. – Vol. 88. – P. 100459.
- [3] **Omatsu, T.** Twisted mass transport enabled by the angular momentum of light / T. Omatsu, K. Masuda, K. Miyamoto, K. Toyoda, N. Litchinitser, Y. Arita, K. Dholakia // *Journal of Nanophotonics*. – 2020. – Vol. 14. – P. 010901.
- [4] **Ni, J.** Three-dimensional chiral microstructures fabricated by structured optical vortices in isotropic material / J. Ni, C. Wang, C. Zhang, Y. Hu, L. Yang, Z. Lao, B. Xu, J. Li, D. Wu, J. Chu // *Light: Science and Applications*. – 2017. – Vol. 6. – P. e17011.
- [5] **Bonse, J.** Laser-induced periodic surface structures—a scientific evergreen / J. Bonse, S. Höhm, S. V. Kirner, A. Rosenfeld J. Krüger // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2016. – Vol. 23. – P. 9000615.
- [6] **Priimagi, A.** Azopolymer-based micro-and nanopatterning for photonic applications / A. Priimagi, A. Shevchenko // *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. – 2014. – Vol. 52. – P. 163–182.
- [7] **Sekkat, Z.** Laser nanofabrication in photoresists and azopolymers / Z. Sekkat, S. Kawata // *Laser & Photonics Reviews*. – 2014. – Vol. 8. – P. 1-26.
- [8] **Porfirev, A.** Writing and reading with the longitudinal component of light using carbazole-containing azopolymer thin films / A. Porfirev, S. Khonina, N. Ivliev, A. Meshalkin, E. Achimova, A. Forbes // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – P. 3477.
- [9] **Grosjean, T.** Photopolymers as vectorial sensors of the electric field / T. Grosjean, D. Courjon // *Optics Express*. – 2006. – Vol. 14. – №. 6. – P. 2203-2210.
- [10] **Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics*. – 2009. – Vol. 1. – №. 1. – P. 1-57.
- [11] **Khonina, S. N.** Simple phase optical elements for narrowing of a focal spot in high numerical-aperture conditions / S. N. Khonina // *Optical Engineering*. – 2013. – Vol. 52. – №. 9. – P. 091711.
- [12] **Furhapter, S.** Spiral interferometry / S. Furhapter, A. Jesacher, S. Bernet, M. Ritsch-Marte // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 15. – P. 1953–1958.

Structured light for laser processing of thin azopolymer films

A. P. Porfirev, S. N. Khonina, N. A. Ivliev, D. P. Porfirev

Image Processing Systems Institute of RAS—Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Samara, Russia

We present a few examples of the use of structured laser beams for laser processing of thin azopolymer films. This material is well known due to its sensitivity to the polarization of incident radiation. Recently, the unique possibilities of processing such materials with structured laser beams with specified amplitude and polarization distributions have been demonstrated. This paper presents both numerical and experimental results demonstrating the possibilities of controlling the profiles of formed microstructures.

Keywords: Structured light, Azopolymers, Polarization, Optical vortices, Cylindrical vector beams.

Новый тип пучков Лагерра-Гаусса с увеличенной центральной теневой областью

В. В. Котляр^{1,2}, Е. Г. Абрамочкин⁵, А. А. Ковалев^{1,2}, Е. С. Козлова^{1,2}, А. А. Савельева^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН; Молодогвардейская, 151, Самара, 443001, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет; Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

³ Физический институт им. Лебедева; Россия, 443011, г. Самара, ул. Ново-Садовая, д. 221

В данной работе исследуется новый пучок Лагерра-Гаусса, который не сохраняет свою структуру при распространении в свободном пространстве, но является Фурье-инвариантным и имеет увеличенную темную область как в начальной плоскости, так и в дальней зоне. Кроме того, пучок является автофокусирующимся.

Ключевые слова: Оптический вихрь, Топологический заряд, Пучок Лагерра-Гаусса, Фурье-инвариантный пучок, Автофокусировка.

Цитирование: Котляр, В. В. Новый тип пучков Лагерра-Гаусса с увеличенной центральной теневой областью / В. В. Котляр, Е. Г. Абрамочкин, А. А. Ковалев, Е. С. Козлова, А. А. Савельева // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 119–121.

Введение

Вихревые пучки Лагерра-Гаусса (ЛГ) на протяжении многих лет вызывают устойчивый интерес в связи с их широкими практическими применениями [1, 2]. В данной работе исследуется новый пучок ЛГ, топологический заряд которого не равен степени радиальной координаты. Это нарушает модальное распространение такого пучка в свободном пространстве. Однако, обсуждаемый пучок демонстрирует интересные свойства: автофокусировку и возможность управления диаметром центрального темного пятна интенсивности без изменения топологического заряда пучка.

Результаты исследования

В данной работе рассматривался пучок ЛГ, комплексная амплитуда которого в начальной плоскости ($z = 0$) описана формулой (1):

$$E_{n,m}(r, \varphi) = \exp\left(-\frac{r^2}{w^2} + i(m-n)\varphi\right) \left(\frac{r}{w}\right)^{m+n} L_n^m\left(\frac{r^2}{w^2}\right), \quad (1)$$

где (r, φ) — полярные координаты, w — радиус перетяжки Гауссова пучка, L_n^m — связанный полином Лагерра.

Аналитически показано, что пучок (1) является Фурье-инвариантным и автофокусируется на расстоянии Рэлея. Теоретические выкладки подтверждены результатами численного моделирования. Использовались следующие параметры: длина волны $\lambda = 532$ нм, радиус перетяжки Гауссова пучка $w_0 = 0,5$ мм, азимутальный и радиальный

индексы связанного полинома Лагерра соответственно $m = 4$ и $n = 3$. Результаты представлены на рис. 1.

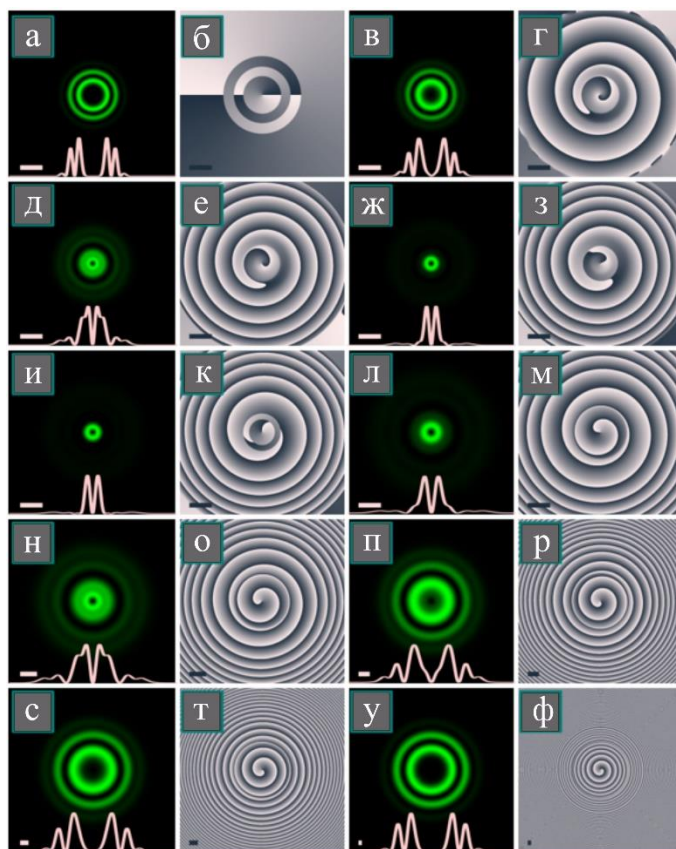


Рис. 1. Интенсивность (столбцы 1 и 3) и фаза (столбцы 2 и 4) пучка ЛГ (1) на следующих расстояниях от перетяжки z/z_0 : 0 (а,б), 1/4 (в,г), 1/2 (д,е), 3/4 (ж,з), 1 (и,к), 1,5 (л,м), 2 (н,о), 3 (п,р), 4 (с,т), 10 (у,ф). Отметки шкалы в левом нижнем углу (светлые в столбцах 1 и 3 и темные в столбцах 2 и 4) эквивалентны 1 мм.

Из рис. 1 видно, что пучки (1) имеют увеличенную темную область в начальной плоскости (рис.1а) и на расстоянии Рэлея фокальное пятно формируется в виде узкого светлого кольца (рис.1и) почти без боковых лепестков. Из рис.1 также видно, что интенсивность в дальнем поле (рис.1с) совпадает с начальной интенсивностью (рис.1а). Это подтверждает свойство Фурье-инвариантности пучков (1).

Заключение

В данной работе представлен пучок ЛГ, который не сохраняет своей поперечной структуры при распространении в свободном пространстве, но является Фурье-инвариантным и имеет увеличенную темную область как в начальной плоскости, так и в дальней зоне. Таким образом диаметр центрального темного пятна интенсивности можно настраивать без изменения топологического заряда. Кроме того, пучок является автофокусирующимся, т.е. распределение интенсивности на Рэлеевском расстоянии от перетяжки имеет форму светового кольца с максимальной интенсивностью на кольце.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда грант № 22-22-00265.

Список источников

[1] **Doster, T.** Watnik, A.T. Laguerre–Gauss and Bessel–Gauss beams propagation through turbulence: analysis of channel efficiency / T. Doster, A.T. Watnik // *Appl. Opt.* — 2016. — Vol. 55. — P. 10239-10246. — DOI: 10.1364/AO.55.010239.

[2] **Ghaderi Goran Abad, M.** Laguerre-Gaussian modes generated vector beam via nonlinear magneto-optical rotation / M. Ghaderi Goran Abad, M. Mahmoudi, // *Sci. Rep.* — 2021. — Vol. 11. — P. 5972. — DOI: 10.1038/s41598-021-85249-8.

A new type of Laguerre-Gaussian beams with an enlarged central shadow region

V. V. Kotlyar^{1,2}, E. G. Abramochkin³, A. A. Kovalev^{1,2}, E. S. Kozlova^{1,2}, A. A. Savelyeva^{1,2}

¹ Institute of Image Processing Systems RAS - branch of the Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS; Molodogvardeiskaya, 151, Samara, 443001, Russia

² Samara National Research University; Russia, 443086, Samara, Moscow highway, 34

³ Physical Institute named after V.I. Lebedev; Russia, 443011, Samara, st. Novo-Sadovaya, 221

In this paper, we study a new Laguerre-Gauss beam, which does not retain its structure when propagating in free space, but is Fourier-invariant and has an enlarged dark region both in the initial plane and in the far zone. In addition, the beam is autofocusing.

Keywords: Optical vortex, Topological charge, Laguerre-Gauss beam, Fourier-invariant beam, Autofocusing.

Эффект Холла в остром фокусе гибридных векторных пучков

В. Д. Зайцев¹, С. С. Стафеев^{1,2}, В. В. Котляр²

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева, Самара, Россия

² Институт систем обработки изображений – филиал Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

Используя уравнения Ричардса-Вольфа, теоретически рассмотрена фокусировка света с круговой поляризацией плоскими дифракционными линзами. Показано, что в фокусе циркулярно поляризованного оптического пучка образуются круговые области разного радиуса с центром на оптической оси с чередующимися направлениями вращения вектора поляризации (по часовой стрелке и против часовой стрелки). Такое зависящее от радиуса разделение противоположно направленных «спинов» является проявлением радиального спинового эффекта Холла в фокусе. Потенциальные области применения следующие: фокус с плоской вершиной может найти применение в микроскопии для получения однородного поля зрения, тогда как эффект Холла с радиальным вращением можно использовать для установки поглощающих микрочастиц в противоположное положение.

Ключевые слова: Эффект Холла, Круговая поляризация, Уравнения Ричардса–Вольфа, Острая фокусировка света.

Цитирование: Зайцев, В. Д. Эффект Холла в остром фокусе гибридных векторных пучков / В. Д. Зайцев, С. С. Стафеев, В. В. Котляр // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 122–124.

Введение

Острая фокусировка обращает на себя внимание исследователей ввиду различных эффектов, которые не проявляются (либо проявляются незначительно) при фокусировке света линзами с малыми числовыми апертурами. Например, в фокусе можно наблюдать сложные картины поперечных потоков энергии [1], конверсию поляризации [2], а при рассмотрении интенсивности в фокусе можно наблюдать фокусные пятна различной формы [3].

В данной работе, применяя подход Ричардса-Вольфа, теоретически рассмотрена фокусировка света с круговой поляризацией плоскими дифракционными линзами. При острой фокусировке света были обнаружены круги разного радиуса с центром на оптической оси, где векторы поляризации вращаются в противоположных направлениях – так называемый эффект Холла.

1. Моделирование

Поле вблизи острого фокуса может быть описано с помощью интеграла Ричардса-Вольфа:

$$U(\rho, \psi, z) = -\frac{if}{\lambda} \iint_{00}^{\theta_0 2\pi} B(\theta, \varphi) T(\theta) \mathbf{P}(\theta, \varphi) \times \exp\{ik[\rho \sin \theta \cos(\varphi - \psi) + z \cos \theta]\} \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1)$$

где $\mathbf{P}(\theta, \varphi)$ – вектор поляризации, для напряжённости электрического и магнитного полей имеющий вид:

$$\mathbf{P}(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} 1 + \cos^2 \varphi (\cos \theta - 1) \\ \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \cos \varphi \end{bmatrix} a(\theta, \varphi) + \begin{bmatrix} \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) \\ 1 + \sin^2 \varphi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \cos \varphi \end{bmatrix} b(\theta, \varphi). \quad (2)$$

Так как интенсивность и осевой поток энергии для света с левой и правой круговой поляризацией одинаковы, то будем рассматривать только одну правую поляризацию, вектор Джонса для которой имеет вид:

$$\mathbf{E}_R = \begin{pmatrix} a(\theta, \varphi) \\ b(\theta, \varphi) \end{pmatrix} = \frac{A(\theta)}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $A(\theta)$ – начальная амплитуда поля, зависящая только от полярного угла.

Проекции вектора напряженности электрического поля вблизи фокуса для начального поля (3) имеют вид:

$$\begin{aligned} E_{x,R} &= \frac{-i}{\sqrt{2}} (I_{0,0} + e^{2i\varphi} I_{2,2}), \\ E_{y,R} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (I_{0,0} - e^{2i\varphi} I_{2,2}), \\ E_{z,R} &= -\sqrt{2} e^{i\varphi} I_{1,1}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$I_{\nu,\mu} = \left(\frac{\pi f}{\lambda}\right) \int_0^{\theta_0} \sin^{\nu+1} \left(\frac{\theta}{2}\right) \cos^{3-\nu} \left(\frac{\theta}{2}\right) T(\theta) A(\theta) e^{ikz \cos \theta} J_\mu(x) d\theta \quad (5)$$

где, $x = kr \sin \theta$, $J_\mu(x)$ – функция Бесселя первого рода.

Из уравнений (4) видно, что отдельные поперечные составляющие интенсивности ненулевые на оси и несимметричны относительно азимутального угла φ , в то время как продольная составляющая интенсивности имеет вид симметричного кольца с нулем при $r = 0$.

Из (4) можно получить распределение интенсивности в фокусе для начального поля (3):

$$I_R(r, z = 0) = I_{0,0}^2 + I_{2,2}^2 + 2I_{1,1}^2. \quad (6)$$

Из (6) видно, что фокусное пятно для света с круговой поляризацией (3) имеет круглую форму, так как распределение интенсивности (6) зависит только от радиальной переменной r .

Рассмотрим поведение поляризации в окрестности острого фокуса для этого случая. Непосредственно в плоскости фокуса при $z = 0$ поляризация остается линейной. Состояние поляризации можно охарактеризовать вектором Стокса или спиновым угловым моментом. Наличие круговой поляризации в поперечном сечении пучка показывает третья компонента вектора Стокса s_3 или продольная компонента SAM_z спинового углового момента (СУМ), они равны друг другу и равны:

$$SAM_z = s_3 = 2\text{Im}(E_x^* E_y) \quad (7)$$

С помощью формул (4) можно показать, что непосредственно в фокусе:

$$SAM_z = I_{0,0}^2 - I_{2,2}^2. \quad (8)$$

Из уравнения (8) видно, что вблизи оптической оси SAM_z положительная, так как $I_{0,0}^2 > I_{2,2}^2$. А на окружности некоторого радиуса, когда выполняется условие $I_{0,0}^2 < I_{2,2}^2$ продольная компонента вектора плотности спина SAM_z становится отрицательной. Таким образом, в

плоскости фокуса должна наблюдаться смена направления вращения круговой поляризации: вблизи оптической оси остается начальная правая круговая поляризация (3), а на некотором удалении от оптической оси появляется световое кольцо с левой круговой поляризацией.

Заключение

Используя уравнения Ричардса-Вольфа, теоретически рассмотрена фокусировка света с круговой поляризацией плоскими дифракционными линзами. Показано, что в фокусе циркулярно поляризованного оптического пучка образуются круговые области разного радиуса с центром на оптической оси с чередующимися направлениями вращения вектора поляризации. Такое зависящее от радиуса разделение противоположно направленных «спинов» является проявлением радиального спинового эффекта Холла в фокусе.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-22-00265.

Список источников

- [1] **Kotlyar, V. V.** Tight focusing with a binary microaxicon / V.V. Kotlyar, S.S.Stafeev, L. O'Faolain // *Optics Letters* – 2011. – Vol. 36(16). – P. 3100-3102
- [2] **Guan, J.** Transversely polarized sub-diffraction optical needle with ultra-long depth of focus / J. Guan, J. Lin, C. Chen, Y. Ma, J. Tan, P. Jin // *Opt. Commun.* – 2017. – Vol. 404. – P.118–123.
- [3] **Lin, J.** Generation of longitudinally polarized optical chain by 4π focusing system / J. Lin, R. Chen, P. Jin, M. Cada, Y. Ma // *Opt. Commun.* – 2015. – Vol. 340. – P. 69-73.

Hall effect in the sharp focus of hybrid vector beams

V. D. Zaitsev¹, S. S. Stafeev^{1,2}, V. V. Kotlyar²

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

² Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics» of the RAS, Moscow, Russia

Using the Richards-Wolf equations, the focusing of circularly polarized light by flat diffractive lenses is theoretically considered. It is shown that at the focus of a circularly polarized optical beam, circular regions of different radii are formed centered on the optical axis with alternating directions of rotation of the polarization vector (clockwise and counterclockwise). This radius-dependent separation of oppositely directed "spins" is a manifestation of the radial spin Hall effect at the focus. Potential applications are as follows: the flat top focus can be used in microscopy to obtain a uniform field of view, while the radial rotation Hall effect can be used to set the absorbing microparticles in the opposite position.

Keywords: Hall effect, Circular polarizing, Richards–Wolf formulas, Sharp focusing of light.

Зондово-оптическая техника нового поколения для современных наномасштабных оптических экспериментов

Д. А. Козодаев¹, Е. В. Кузнецов¹, А. О. Погonyшев², М. А. Трусов¹

¹ ООО «Активная Фотоника», Зеленоград, Россия

² ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия

На сегодняшний день группой компаний НТ-МДТ уже разработана высоко-профессиональная зондово-спектральная измерительная система нового поколения, в которой конструктивно предусмотрена максимально гибкая архитектура и заложено множество возможностей для реализации самых сложных научных экспериментов, как в оптической спектроскопии так и в зондовой наноскопии.

Ключевые слова: Атомно-силовая микроскопия, Зондово-оптическая техника, Наноструктуры.

Цитирование: Козодаев, Д. А. Зондово-оптическая техника нового поколения для современных наномасштабных оптических экспериментов / Д. А. Козодаев, Е. В. Кузнецов, А. О. Погonyшев, М. А. Трусов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 125–126.

Наша компания представляет на конференции «HOLOEXPO-2023» научное оборудование Группы компаний ООО «НТ-МДТ» (ИНН 7735184244), одного из ведущих разработчиков оптико-зондового оборудования для нано-спектральных исследований.

Бренд «НТ-МДТ» («NT-MDT») имеет давнюю историю, и хорошо известен во всём научном мире. Команда «НТ-МДТ» была первой, кто выпустил на мировой рынок комбинированную АСМ+КР установку для измерений спектральных свойств материалов с нанометровым латеральным разрешением, еще в 2004 г. С тех пор прошло уже почти 20 лет, и производитель все эти годы не стоял на месте! На сегодняшний день нами уже разработана высоко-профессиональная зондово-спектральная измерительная система нового поколения, в которой конструктивно предусмотрена максимально гибкая архитектура и заложено множество возможностей для реализации самых сложных научных экспериментов, как в оптической спектроскопии так и в зондовой наноскопии.

Спектральная часть нашей измерительной системы изначально спроектирована под удобную интеграцию с атомно-силовым микроскопом, и позволяет довольно легко выйти на режим зондового усиления спектрального сигнала (TERS, TEPL). Далее функциональность будет расширена в область реализации мульти-фотонных процессов, в том числе с высоким временным разрешением, с возможностью построения гиперспектральных карт нелинейных зондово-оптических взаимодействий.

Стремясь к максимальной локализации производства зондового и спектрального оборудования на территории России, наша команда уже разработала и самостоятельно серийно выпускает твердотельные термостабилизированные лазеры видимого и ближнего

ИК диапазона для рамановской и фотолюминесцентной спектроскопии стационарных состояний, которые можно использовать как с техникой нашего производства, так и с приборами сторонних производителей.

Конструктивная схема наших лазерных источников построена на интеграции специально отобранных лазерных диодов с отражающими объемными брэгговских решетками, с целью выделения и стабилизации единственной моды в спектре излучения. Наши лазеры отличается высокая стабильность по мощности, узкая ширина линии излучения, гауссовский профиль пучка, высокий коэффициент подавления боковых мод. Мы выпускаем лазерные источники в диапазоне мощностей от десятков до сотен мВт, в вариантах исполнения с открытым пучком на выходе и с заведением излучения в оптическое волокно.

Одним из ключевых компонентов любой микроспектральной системы является спектральный детектор. К сожалению, самые сильные в технологическом плане производители детекторов, которые очень популярны в оптических научных лабораториях по всему миру, на сегодняшний день практически ушли с российского рынка. При этом требования ко всем компонентам детектора современными спектроскопистами предъявляются весьма жесткие, как в части качества изготовления самого чипа, так и в части работы системы охлаждения, уровня вакуумирования, и, разумеется в части скорости работы и шумов управляющей электроники детектора.

Исходя из текущих обстоятельств наша команда несколько месяцев назад инициировала перспективный проект по собственному производству охлаждаемых малошумящих ПЗС камер видимого диапазона для спектральной техники, максимально локализованному на территории России, включая электронику и управляющее ПО. Мы рассчитываем выйти на серийное производство ПЗС камер примерно к концу 2023 г., и предполагаем, что они будут применяться не только со спектральными приборами нашего производства, но и в других сложных оптических экспериментах.

Next-generation probe-optical equipment for advanced nanoscale optical experiments

D. A. Kozodaev¹, E. V. Kuznetsov¹, A. O. Pogonyshv², M. A. Trusov¹

¹ Active Photonics LLC, Zelenograd, Russia

² FSUE "All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements", Moscow, Russia

To date, the group of companies NT-MDT has already developed a highly professional probe-spectral measuring system of a new generation, which provides the most flexible architecture and many opportunities for the realization of the most complex scientific experiments, both in optical spectroscopy and probe nanoscopy.

Keywords: Atomic force microscopy, Probe-optical technique, Nanostructures.

Конфигурируемые вихревые лазерные пучки для оптического манипулирования ансамблями микрочастиц

Д. А. Иконников¹, С. А. Вьюнышева¹, Н. Н. Давлетшин^{1,2}, Д. В. Прокопова³, Н. Н. Лосевский³,
С. А. Самагин³, С. П. Котова³, А. М. Вьюнышев^{1,2}

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Самарский филиал ФИАН, Самара, Россия

В работе рассмотрено формирование фазовых голограмм методом суперпозиции модуляций для получения вихревых лазерных пучков. Полученные лазерные пучки применены в схеме оптического пинцета для захвата и манипулирования ансамблями микрочастиц. Продемонстрирована возможность независимого управления положением вихревых лазерных пучков и их орбитальным угловым моментом. Полученные результаты открывают новые возможности для оптических манипуляций в приложениях биофотоники.

Ключевые слова: Оптическое манипулирование, Оптотермическая ловушка, Вихревой лазерный пучок, Суперпозиция модуляций, Микросферы латекса.

Цитирование: Иконников, Д. А. Конфигурируемые вихревые лазерные пучки для оптического манипулирования ансамблями микрочастиц / Д. А. Иконников, С. А. Вьюнышева, Н. Н. Давлетшин, Д. В. Прокопова, Н. Н. Лосевский, С. А. Самагин, С. П. Котова, А. М. Вьюнышев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 127–129.

Изобретение оптического пинцета [1] определило значительный прогресс в области микроманипуляций и детектировании одиночных молекул. На сегодняшний день оптический пинцет широко применяется в различных областях науки, включая физические [2] и химические [3] науки, но наиболее полно технология оптического пинцета была реализована в биомедицинских приложениях ввиду неинвазивности метода [4]. Однако особый интерес представляют комбинированные оптотермические ловушки, в которых лазерное излучение используется не только как источник сил светового давления, но и для формирования градиента температур в жидкой среде. Применение структурированного света в схеме оптотермической ловушки расширяет существующий арсенал методов оптических манипуляций вследствие возможности контроля ряда параметров вихревых лазерных пучков.

В настоящем докладе сообщаются результаты по синтезу голограмм для получения набора вихревых лазерных пучков с заданным положением и величиной орбитального углового момента. Для синтеза голограмм использовался метод суперпозиции модуляций, преимущество которого является простота использования и возможность расчета требуемых голограмм без привлечения итерационных численных методов. На Рис. 1 приведен пример синтезируемой голограммы и измеренное распределение интенсивности в плоскости оптотермической ловушки. Из рисунка видно, что используемый подход позволяет

формировать набор вихревых лазерных пучков. Численные расчеты показывают, что величины топологических зарядов (ТЗ) рассматриваемых пучков хорошо согласуются со значениями ТЗ, задаваемых на этапе проектирования голограмм.

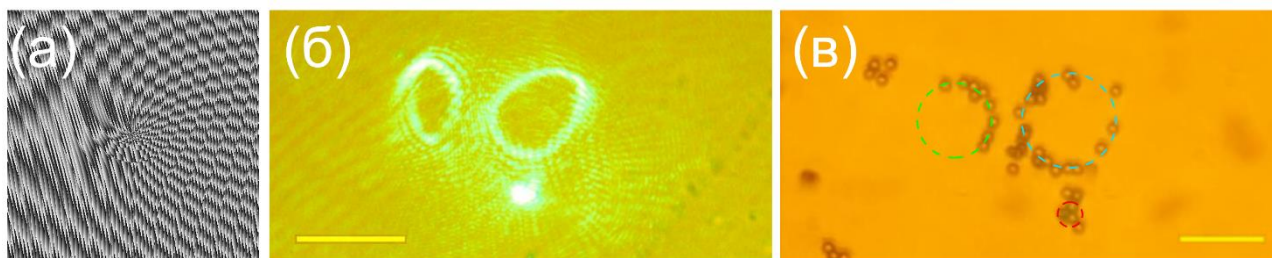


Рис. 1. Синтезированная фазовая голограмма (черный – 0, белый - 2 π) (а), вихревые пучки в плоскости оптотермической ловушки (б) и демонстрация оптического захвата микросфер латекса вихревыми пучками (в)

В эксперименте по оптическому манипулированию использовались латексные микрочастицы с диаметром 2 мкм. В режиме нагрева лазерным излучением под действием конвективных потоков микросферы устремлялись в область оптического пинцета и образовывали кольцевые пространственные конфигурации, как показано на Рис. 1. По мере изменения фазовых голограмм менялось и положение одного из вихревых лазерных пучков, что приводило к смещению ансамбля микросфер. В динамике наблюдалось орбитальное движение микрочастиц по часовой стрелке.

Таким образом, показана возможность синтеза фазовых голограмм методом суперпозиции модуляций для получения вихревых лазерных пучков и их использования в схеме оптотермической ловушки. Полученные результаты представляют интерес для развития технологий нано- и микроманипуляций в биомедицинских приложениях.

Список источников

- [1] **Ashkin A**, Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. *Physical Review Letters* 1970; 24: 156-159.
- [2] **Blums V**, Piotrowski M, Hussain MI, Norton BG, Connell SC, Gensemer S, Lobino M, Streed EW, A single-atom 3D sub-atto-newton force sensor. *Science Advances* 2018; 4(3).
- [3] **Liu LR**, Hood JD, Yu Y, Zhang JT, Hutzler NR, Rosenband T, Ni KK, Building one molecule from a reservoir of two atoms. *Science* 2018; 360(6391): 900-903.
- [4] **Ashkin A**, Dziedzic JM, Optical Trapping and Manipulation of Viruses and Bacteria. *Science* 1987; 235(4795): 1517-1520.

Configurable vortex laser beams for optical manipulations of microparticle ensembles

D. A. Ikonnikov¹, S. A. Vyunisheva¹, N. N. Davletshin^{1,2}, D. V. Prokopova³, N. N. Losevsky³, S. A. Samagin³, S. P. Kotova³, A. M. Vyunishev^{1,2}

¹ Kirensky Institute of Physics, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ Lebedev Physical Institute, Samara, Russia

The paper considers the formation of phase holograms by the method of superposition of modulations to obtain vortex laser beams. The resulting laser beams are used in the scheme of optical tweezers for trapping and manipulating microparticle ensembles. The possibility of independent control of the position of vortex laser beams and their orbital angular momentum is demonstrated. The results obtained open up new possibilities for optical manipulations in biophotonic applications.

Keywords: Optical manipulation, Optothermal trap, Vortex laser beam, Modulation superposition, Latex microspheres.

Голографический датчик волнового фронта на основе диффузных Фурье – голограмм

В. Ю. Венедиктов, Е. А. Федоров, Д. В. Масыгин

Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

В данной статье дано описание продвижения в настройке прототипа установки для создания чувствительного элемента голографического датчика волнового фронта. Внесенные изменения позволили записать aberrации волнового фронта в полиномах Цернике на голограммы и уверенно воспроизводить их опорным пучком.

Ключевые слова: Адаптивная оптика, Голограммы, Полиномы Цернике, Анализ волнового фронта.

Цитирование: **Венедиктов, В. Ю.** Голографический датчик волнового фронта на основе диффузных Фурье – голограмм / В. Ю. Венедиктов, Е. А. Федоров, Д. В. Масыгин // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 130–133.

Введение

Голографический датчик волнового фронта является перспективной прибором для определения aberrаций волнового фронта. Преимущество этого датчика заключается в том, что нет необходимости в каких-либо сложных и трудоемких вычислениях. По сути, датчик представляет собой полностью оптическую систему обнаружения и параллельной обработки. В результате полоса пропускания ограничена только скоростью, с которой позиции сфокусированных точек могут быть считаны.

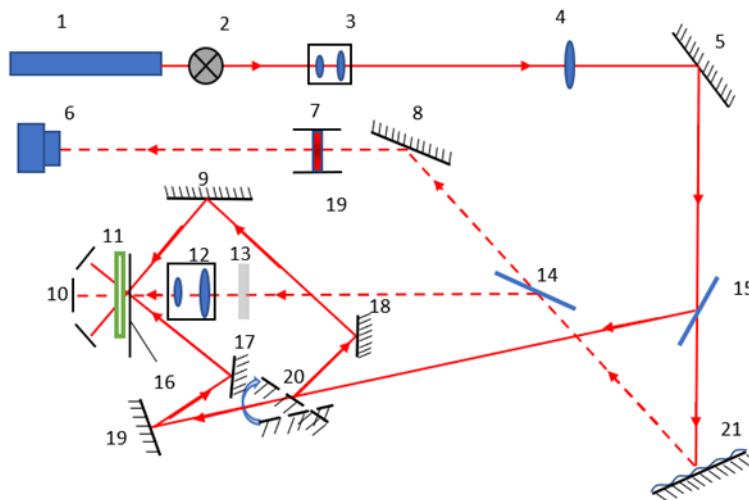
Принцип работы датчика основан на способности голограмм воспроизводить мнимое изображение объектной волны при освещении её опорной волной. Каждая голограмма записывается со своей aberrацией волнового фронта в объектном пучке, описываемой через полиномы Цернике. Таким образом датчик состоит из нескольких голограмм, каждая из которых реагирует на свою aberrацию и восстанавливает опорную волну. Ставится задача создания лабораторной установки для записи таких голограмм.

1. Экспериментальная установка

Лабораторная установка для записи голограмм использует схему Лейта-Упатниекса. На фотопластинку одновременно падают два луча при записи голограммы. Один луч объектный – падает перпендикулярно фотопластинке, объектом служит мембранное зеркало. Второй луч – опорный – падает под углом. С помощью откидного зеркала можно менять направление падения опорного пучка: слева или справа. Схема хода лучей и расположения элементов изображена на рисунке 1, а внешний вид прототипа на рисунке 2.

Голограммы записываются на фотопластинках ПФГ-01 в виде окружностей, диаметром 2 мм и с шагом между центрами в 3 мм. Проявляются и устанавливаются обратно в тоже место

установки, как при записи. Далее исследуются сигналы голограмм массива на освещение разными волновыми фронтами. Вычисляется дифракционная эффективность.



Прямая линия – опорная волна; линия с пунктиром – объектная волна. 1- He-Ne лазер; 2,- диафрагма; 3- микрообъектив; 4 – линза; 5, 8, 9,17, 18,19 – глухие зеркала; 6 – датчик Шака – Гартмана; 7 – светофильтр; 10 – экраны; 11 – фотопластинка; 12 – объектив Гелиос; 13– диффузор; 14, 15 – светоделители; 16 – подвижная диафрагма; 20 – откидное зеркало; 21– мембранное зеркало

Рис. 1. Схема хода лучей в лабораторной установке

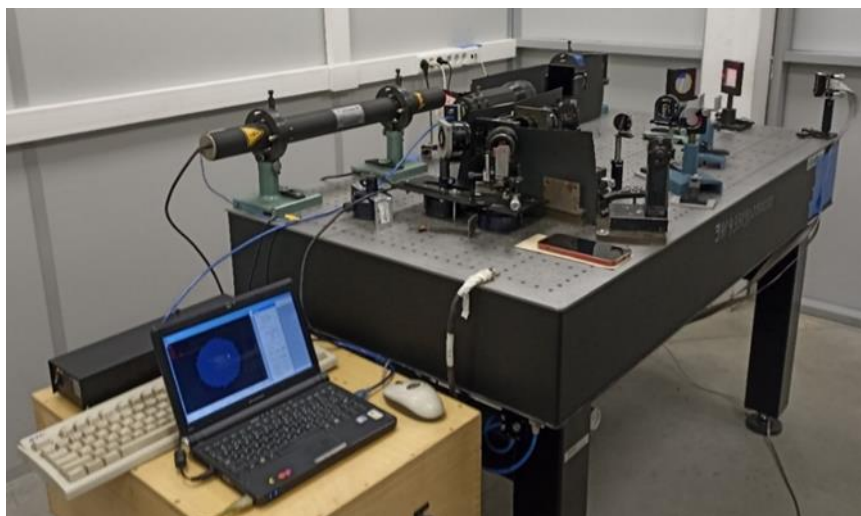


Рис. 2. Экспериментальная установка для записи голограмм

За последнее время удалось решить некоторые проблемы с задаванием полиномов Цернике с помощью мембранного зеркала и их восприятию программой разложения волнового фронта ДШГ. Отключив для отображения полиномы наклонов и фокуса были получены фазовые изображения полиномов, совпадающие с их теоретическими изображениями.

2. Полученные результаты

Внесенные изменения позволили обнаружить сигнал от новых голограмм. Значит удалось воспроизвести условия записи после проявления голограмм. Эти голограммы записывались без aberrаций, для поиска опытным путем оптимального времени экспозиции. Наибольшие значения дифракционной эффективности наблюдались при 15 с. и 27 с. экспозиции и составили 1,27%. Чувствительности фотопластинки – нелинейная функция, поэтому нужно провести дополнительную запись на этих интервалах для выбора лучших условий.

В результате следующей записи удалось получить голограммы aberrаций волнового фронта. При освещении голограмм через диафрагму опорным пучком были зафиксированы мнимые изображения полиномов Цернике. Пример указан на рисунке 3.



Рис. 3. (а) Воспроизведенный полином. (б) Распределение волнового фронта на ДШГ при записи голограммы.

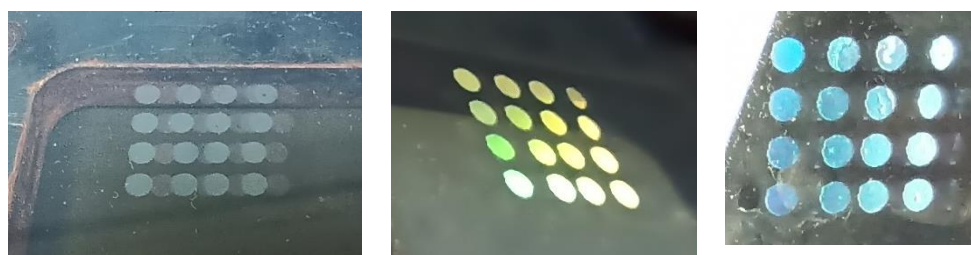


Рис. 4. Записанные голограммы с разных ракурсов

Заключение

На экспериментальной установке удалось отработать процедуру записи голограмм, их дальнейшее проявление и испытания. На данный момент качество записи низкое, но работы по улучшению ведутся.

Список источников

- [1] Венедиктов В. Ю. Основы адаптивной оптики: учеб. пособие // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – Т. 48.
- [2] Орлов В. В. Голографический модовый датчик волнового фронта с увеличенным числом измеряемых мод // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 8. – С. 773-776.

- [3] Федоров Е.А. Голографический датчик волнового фронта на основе диффузных Фурье голограмм // ВКР.– 2018. – 87 стр.
- [4] Andersen G., Ghebremichael F., Gurley K. Holographic wavefront sensor: fast sensing, no computing // Practical Holography XXI: Materials and Applications. – SPIE, 2007. – Т. 6488. – С. 124-131.

Holographic wavefront sensor using diffuse Fourier holography

V. Y. Venediktov, E. A. Fedorov, D. V. Masygin

Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia

The results of the implementation of the first multichannel holographic wavefront sensor based on non-overlapping Fourier holograms of the first five Zernike polynomials (excluding the piston shift and the slopes of the wavefront) are presented. It is shown that such a sensor circuit, unlike previously implemented ones, is free from cross-noise, and also allows optimal use of radiation energy in the measuring channel.

Keywords: Holographic wavefront sensor, Diffuse-scattered beam, Fourier holography.

Прототип волоконно-оптического резонаторного гироскопа с делителем 3×3 на сохраняющем поляризацию волокне

К. А. Овчинников^{1,2}, Д. Г. Гилев^{1,2}, В. В. Криштоп^{1,2}, М. А. Ветошкин²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия

В работе представлен прототип волоконно-оптического резонаторного гироскопа с делителем 3×3 на волокне, сохраняющем поляризацию. При применении изотропного волокна возникает эффект поляризационной невязимости, заключающийся в том, что свет, распространяющийся внутри резонатора в противоположных направлениях, приходит на фотоприемник в разных состояниях поляризации, вследствие чего глубина интерференции снижается. В отличие от прототипа на изотропном волокне, волокно с сохранением поляризации позволяет устранить поляризационную невязимость тем самым повышает стабильность работы гироскопа.

Ключевые слова: Волоконно-оптический гироскоп, Резонаторы, Сохраняющее поляризацию волокно, Поляризационная невязимость.

Цитирование: Овчинников, К. А. Прототип волоконно-оптического резонаторного гироскопа с делителем 3×3 на сохраняющем поляризацию волокне / К. А. Овчинников, Д. Г. Гилев, В. В. Криштоп, М. А. Ветошкин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 134–138.

Введение

Резонаторная схема оптических гироскопов является следующим эволюционным шагом в развитии оптической гироскопии, о чем говорят последние исследования [1, 2, 3]. Оптический кольцевой резонатор может быть реализован с помощью волоконно-оптических сплавных разветвителей с неравными коэффициентами деления, которые соединяются путем оптической сварки в замкнутый кольцевой контур. Проблема резонаторного гироскопа заключается в том, что измерение смещения резонансных частот из-за вращения не осуществимо напрямую, для этого необходимо применение специальных способов детектирования угловой скорости. В качестве потенциального способа в работе применяется интерференция двух резонансных спектров в разветвителе 3×3, в котором возникают постоянные фазовые смещения излучения при прохождении через разветвитель.

В работе [4] рассматривалась схема волоконно-оптического резонаторного гироскопа с делителем 3×3. Проблемой предлагаемой схемы стала поляризационная невязимость возникающая в резонаторном контуре, влияющая на глубину интерференции, что вызывает сильную нестабильность сигнала и масштабного коэффициента. Одним из возможных вариантов решения данной проблемы может стать применение компонентов с сохранением поляризации.

Методика

В данной работе рассматривается схема волоконно-оптического резонаторного гироскопа с делителем 3x3 представленная на рисунке 1.

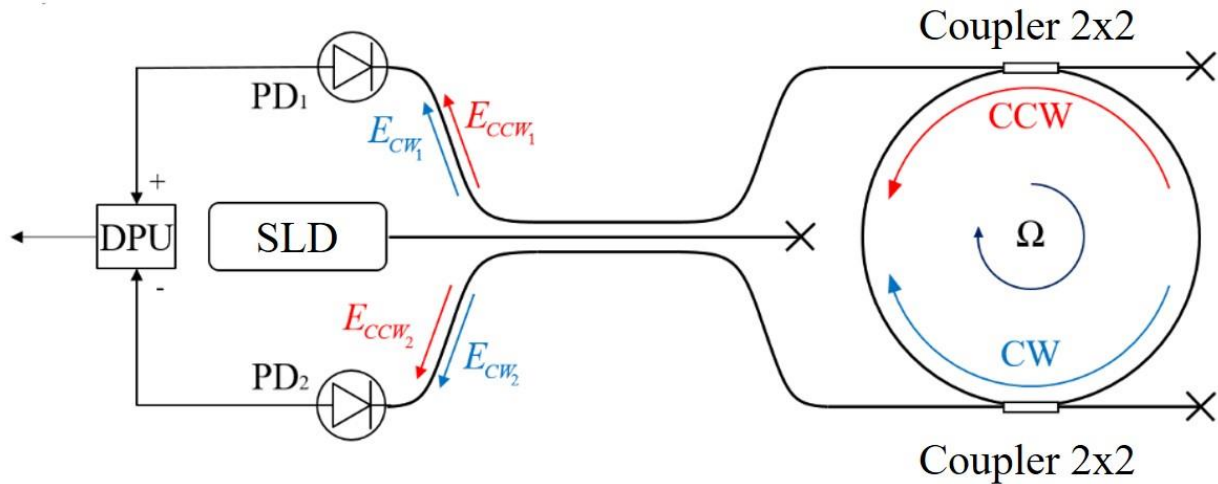


Рис. 1. Схема пассивного резонансного волоконно-оптического гироскопа с делителем 3x3. SLD – Суперлюминесцентный диод; PD1, PD2 – фотоприемники; DPU – блок обработки данных, CW и CCW – излучение, проходящее по и против часовой стрелки соответственно (ось вращения перпендикулярна плоскости рисунка, направление вращения совпадает с направлением часовой стрелки)

В отличие от схемы, предлагаемой в [4] в данной работе все используемые компоненты выполнены на сохраняющем поляризацию волокне типа PANDA. В случае применения изотропного волокна излучение при распространении неизбежно изменяет состояние поляризации, что является критичным при встречном распространении лучей [5]. Если излучения, распространяющиеся в резонансном контуре, будут иметь различное состояние поляризации, то это будет означать различные собственные частоты из-за отличия показателей преломления, а также снижении глубины интерференции результирующего сигнала на фотоприемниках.

Применение волокна типа PANDA позволит поддерживать стабильное состояние поляризации излучения на протяжении всего пути тем самым будет соблюдено соответствие резонансных частот для излучений, распространяющихся в различных направлениях внутри резонансного контура и поддержание постоянства глубины интерференции результирующего сигнала.

Результаты эксперимента

В ходе работы собран прототип волоконно-оптического резонаторного гироскопа с делителем 3x3, как показано на рисунке 1. Измерение амплитудно-частотной характеристики выходного сигнала гироскопа на волокне типа PANDA в сравнении с такой же характеристикой гироскопа на изотропном волокне представлено на рисунке 2.

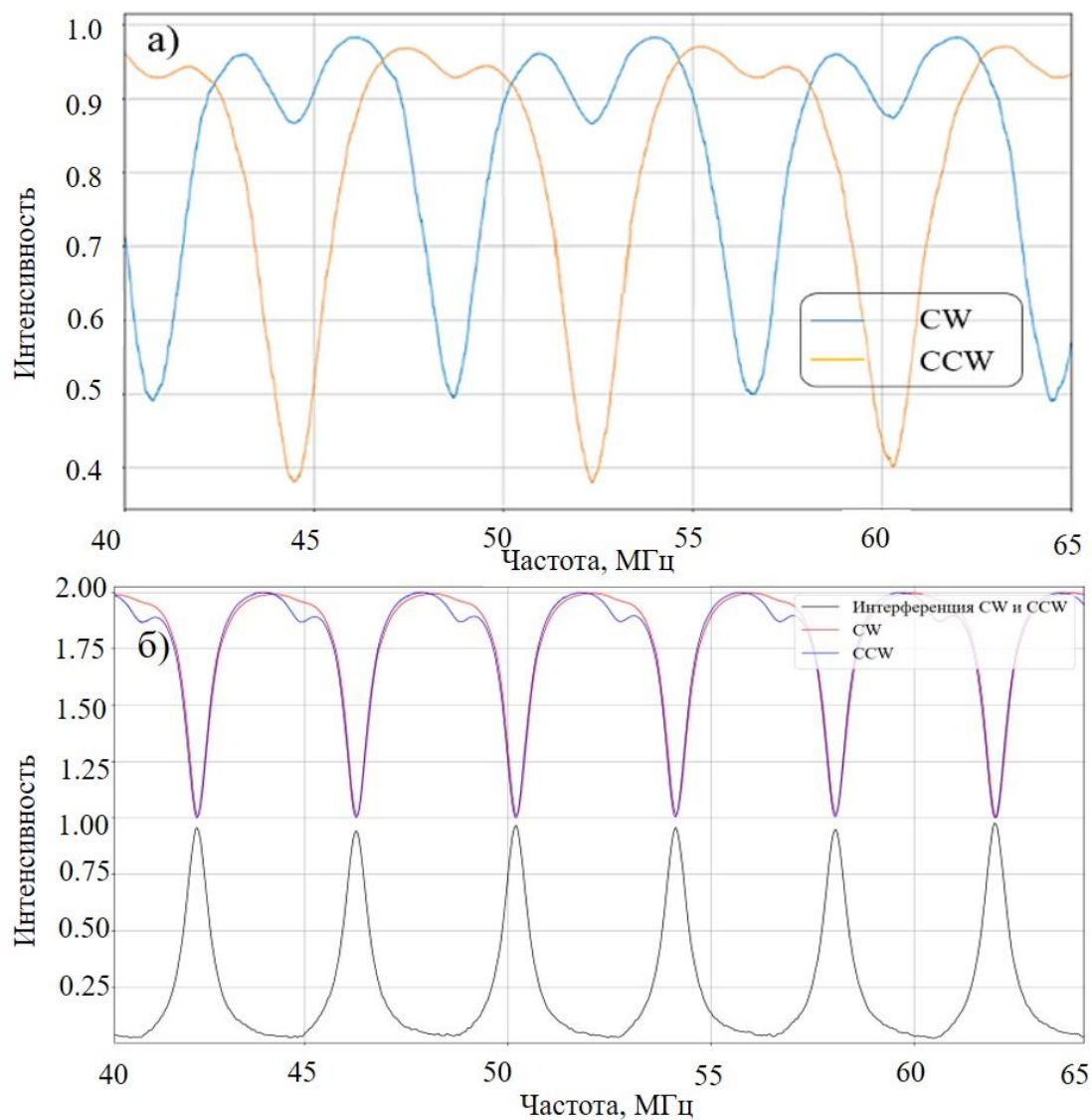


Рис. 2. Сравнение амплитудно-частотных характеристик выходных сигналов гироскопов на изотропном и сохраняющем поляризации волокнах. а) Амплитудно-частотная характеристика гироскопа на изотропном волокне. б) Амплитудно-частотная характеристика гироскопа на сохраняющем поляризацию волокне.

Сравнение данных характеристик показывает высокую поляризационную стабильность и отсутствие побочных резонансных частот, вызванных изменением состояния поляризации. На рисунке 3 представлена вариация Аллана сигнала собранного гироскопа.

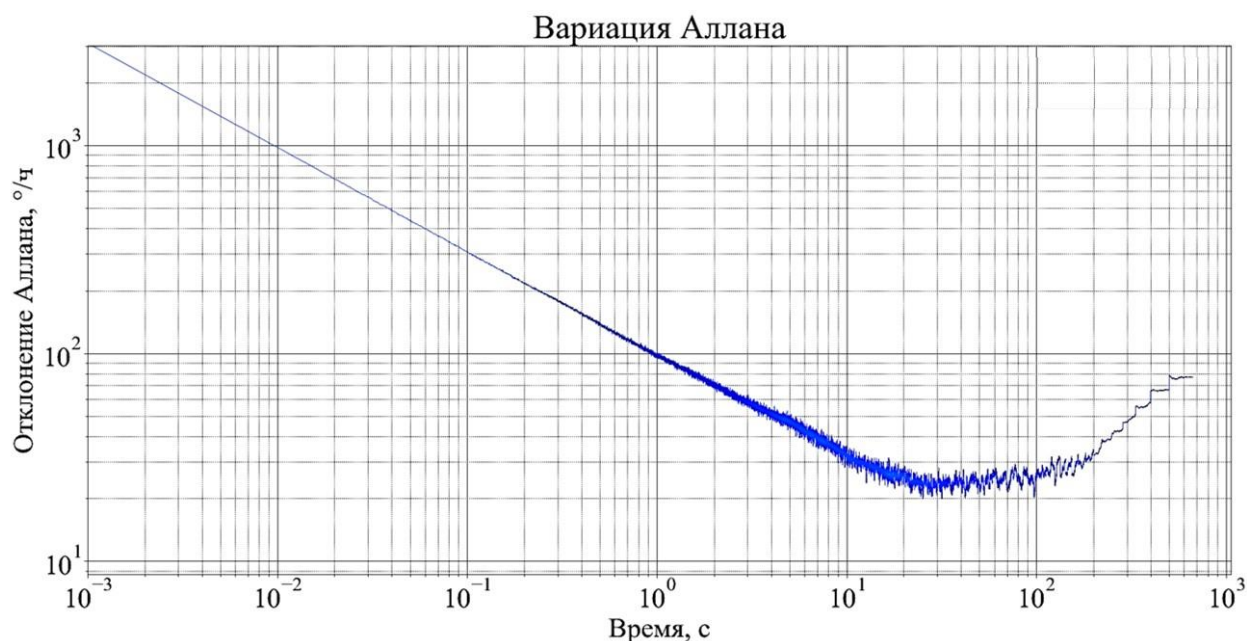


Рис. 3. Вариация Аллана сигнала волоконно-оптического резонаторного гироскопа с делителем 3×3 на сохраняющем поляризацию волокне.

По данным вариации Аллана нестабильность нуля составляет 23 °/ч и случайное блуждание угла $1.6 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. Конфигурация оптического гироскопа с разветвителем 3×3 хорошо подходит для построения простых и дешевых гироскопов средней точности (10 - 100 °/ч).

Обсуждение

Схема представленного волоконно-оптического резонаторного гироскопа с делителем 3х3 на сохраняющем поляризацию волокне демонстрирует значительно большую повторяемость результатов и стабильность, чем та же схема на изотропном волокне. Благодаря применению волокна с сохранением поляризации удалось устранить влияние поляризационной невязимности. Гироскоп с данными параметрами удовлетворяет промышленному и тактическому классу точности. Таким образом показана возможность создания недорогого миниатюрного оптического гироскопа с детектируемой угловой скоростью 20 °/ч на основе волоконно-оптического резонатора.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

Список источников

- [1] Kuai X. et al. Suppression method of optical noises in resonator-integrated optic gyroscopes // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – №. 8. – P. 2889.
- [2] Gilev D. G. et al. Fiber optic resonators for angular rate sensors // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2022. – Vol. 86. – №. Suppl 1. – P. S75-S80.
- [3] Filatov Y. V. et al. Experimental Investigation of an Optical Resonator Gyroscope with a Mach–Zehnder Modulator and Its Sensitive Elements // Photonics. – MDPI, 2022. – Vol. 10. – №. 1. – P. 4.

- [4] Ovchinnikov K. A. et al. A Prototype for a Passive Resonant Interferometric Fiber Optic Gyroscope with a 3×3 Directional Coupler // Sensors. – 2023. – T. 23. – №. 3. – C. 1319.
- [5] Gilev D. G. et al. Determination of induced birefringence in a fiber-optic resonator from the frequency difference between main and additional resonance peaks // Optics Continuum. – 2022. – T. 1. – №. 3. – C. 487-493.

Prototype of a fiber-optic resonator gyroscope with a 3×3 coupler on a polarization-maintaining fiber

K. A. Ovchinnikov^{1,2}, D. G. Gilev^{1,2}, V. V. Krishtop^{1,2}, Vetoshkin M. A.²

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

² Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russia

The paper presents a prototype of a fiber-optic resonator gyroscope with a 3x3 coupler on a polarization-maintaining fiber. When using an isotropic fiber, the effect of polarization nonreciprocity arises, which consists in the fact that light propagating inside the resonator in opposite directions arrives at the photodetector in different states of polarization, because of which the depth of interference decreases. In contrast to the prototype on isotropic fiber, polarization-maintaining fiber eliminates polarization nonreciprocity, thereby increasing the stability of the gyroscope.

Keywords: Fiber optic gyroscope, Resonators, Polarization-maintaining fiber, Polarization nonreciprocity.

Проблемы эффективности голографических волноводных дисплеев дополненной реальности

А. Н. Путилин¹, С. Е. Дубынин^{1,2}, А. В. Морозов¹, Н. А. Путилин^{1,3}

¹ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва, Россия

³ Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

Волноводные голографические перископы оказались одним из наиболее оптимальных оптических элементов для совмещения виртуального и реального изображений в схемах дисплеев дополненной реальности (AR). При этом большинство экспериментально проверенных схем дисплеев данного типа основаны на трехголограммной схеме с размножением зрачка по двум координатам и отличаются очень низкой эффективностью. В докладе произведен анализ возможных путей повышения световой эффективности волноводных голографических дисплеев. Рассмотрены альтернативные оптические схемы голографических волноводных неизображающих перископов, а также различные варианты построения оптических схем проекторов виртуального изображения. Экспериментально проверены несколько новых схем построения AR дисплеев.

Ключевые слова: Голографические оптические элементы, дисплеи дополненной реальности, волноводные голограммы.

Цитирование: Путилин, А. Н. Проблемы эффективности голографических волноводных дисплеев дополненной реальности / А. Н. Путилин, С. Е. Дубынин, А. В. Морозов, Н. А. Путилин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 139–143.

Введение

Системы дополненной реальности являются быстроразвивающимся направлением современной оптики, ввиду их высокой практической востребованности [1,2]. Ключевым элементом системы дисплея дополненной реальности является устройство совмещения световых пучков – бим-комбайнеры (beam combiners – BC). Волноводные голографические перископы имеют ряд преимуществ, что подтверждено их широким использованием в системах дополненной реальности [3]. Однако существует и ряд недостатков, в частности, низкая световая эффективность.

1. Причины низкой световой эффективности трехголограммной схемы

На рис. 1 показаны основные варианты схем волноводных голографических перископов, используемые в системах дополненной реальности [4]. На рис. 1 а) и 1 б) показаны трехголограммные схемы. Данные схемы впервые были использованы в серийных устройствах фирмами Microsoft и WaveOptics. Их различие состоит в том, что в первом случае мультипликация выходного зрачка производится по двум направлениям последовательно, во втором – одновременно на наложенных голограммах. Однако в обоих присутствует три

волноводные голограммы (ВГ) – вводная (ВГ1), и голограммы ВГ2 и ВГ3, обеспечивающие двумерную размножение зрачка.

На рис. 1 в) показана двухголограммная схема. Она может обеспечить увеличение размера выходного зрачка только по одной координате, то есть требует использования проекционного объектива большего размера. В связи с этим наибольшее распространение получили перечисленные выше трехголограммные схемы.

В общем случае, волноводные голограммы могут быть как рельефными, так и береговскими. Для повышения дифракционной эффективности (ДЭ) рельефных дифракционных решеток могут применяться несимметричные профили штрихов и вариации глубины решетки по площади волноводной голограммы. Но сначала необходимо рассмотреть общую конфигурацию конкретного типа ВГ, и рассмотрим схему только с точки зрения приближения геометрической конфигурации волноводных пучков.

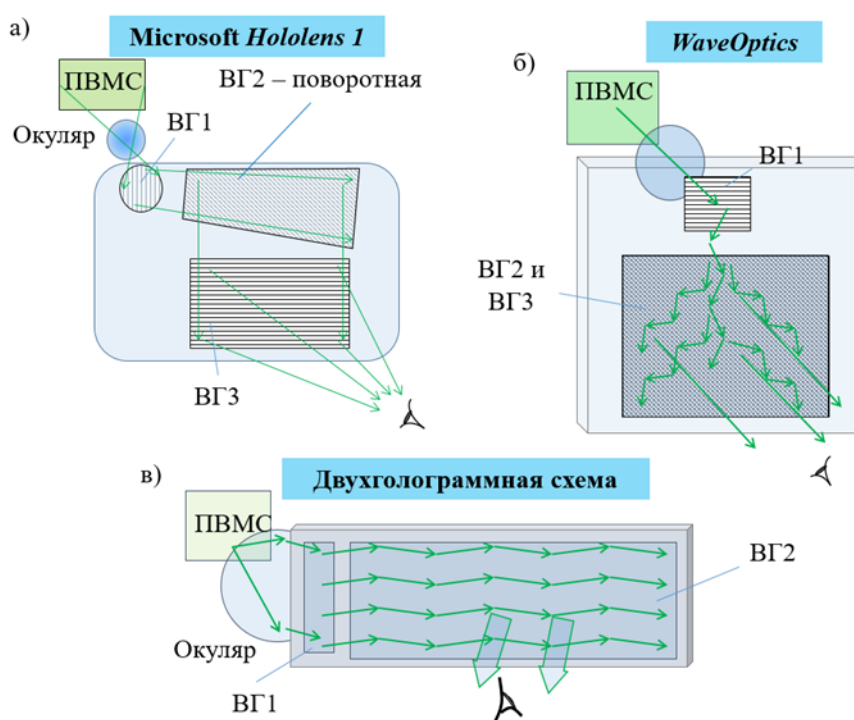


Рис. 1. Основные схемы построение волноводных голографических перископов

На рис. 2 показана вариация схемы WaveOptic, предложенная в ФИАН с диагональным расположением вводной и выводных решеток. Такая схема позволяет уменьшить общие габариты системы. Трассировка лучей выполнялась в специализированной программе собственной разработки.

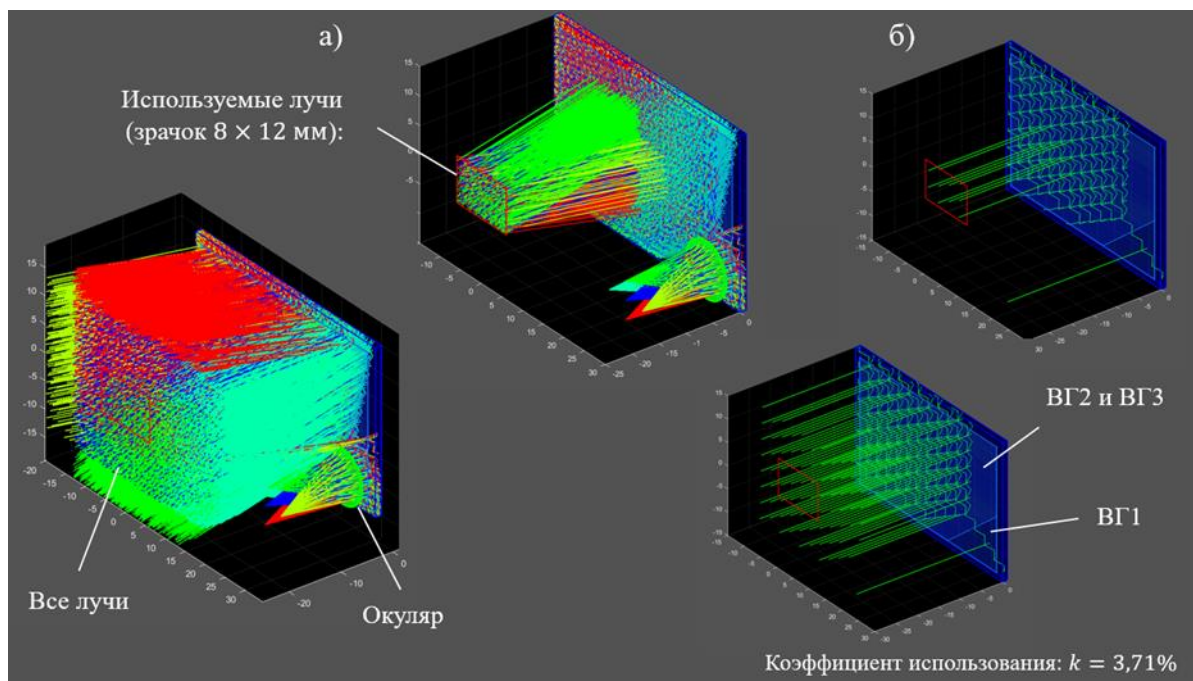


Рис. 2. Моделирование хода лучей в трехголограммной схеме с вводом с угла. (а) – пучки лучей по полю; (б) – размножение одного луча для фиксированного угла поля

На рис. 2(а) приведено сравнение двух вариантов трассировки лучей. В первом случае показаны все лучи, образуемые при дифракции в +/- 1-ые порядки. Во-втором варианте – лучи, попавшие в выходной зрачок с размером 8×12 мм. Данный рисунок наглядно демонстрирует, какое количество излучения не используется в данной схеме. Стоит отметить, что для рельефных симметричных профилей голографической решетки дифракция также идет и в сторону, противоположную от наблюдателя, что дополнительно уменьшает эффективность такого рода волноводных перископических дисплеев.

На рис. 2(б) для наглядности приведена трассировка для одного падающего луча, идущего под нормалью к поверхности. Число размноженных лучей на выходе $N_{\text{все}} = 41349$ (с учетом только +/- 1-ых порядков дифракции), из них попадает в выходной зрачок: $N_{\text{вс}} = 1534$. То есть коэффициент использования: $k = 3,71\%$. То есть вне зависимости от типа регистрирующей среды и даже при оптимально распределении ДЭ по голограмме на выходе мы получаем суммарную эффективность работы бим-комбайнера порядка единиц процентов. Для ряда угловых полей она составляет еще меньше значения.

При этом число переотражений в области выводной решетки в данной схеме составляет 29, что приводит к заметному ослаблению чисто за счет потерь на поглощение в среде и при отражении.

2. Альтернативные схемы

В разы большей световой эффективностью обладает двухголограммная схема. На рисунке 3(а) показан вариант, полученный из расчета в обратном ходе лучей. В нем показан идеальный вариант проектора, который формирует только те пучки лучей, которые впоследствии попадут в выходной зрачок. Как можно видеть, данный проектор должен по своей схеме

заметно отличаться от привычных окуляров, работающих с симметричными выходными зрачками. При этом он может быть достаточно компактным. В рамках проводимых исследований были рассмотрены различные варианты построения оптических систем проекторов такого типа.

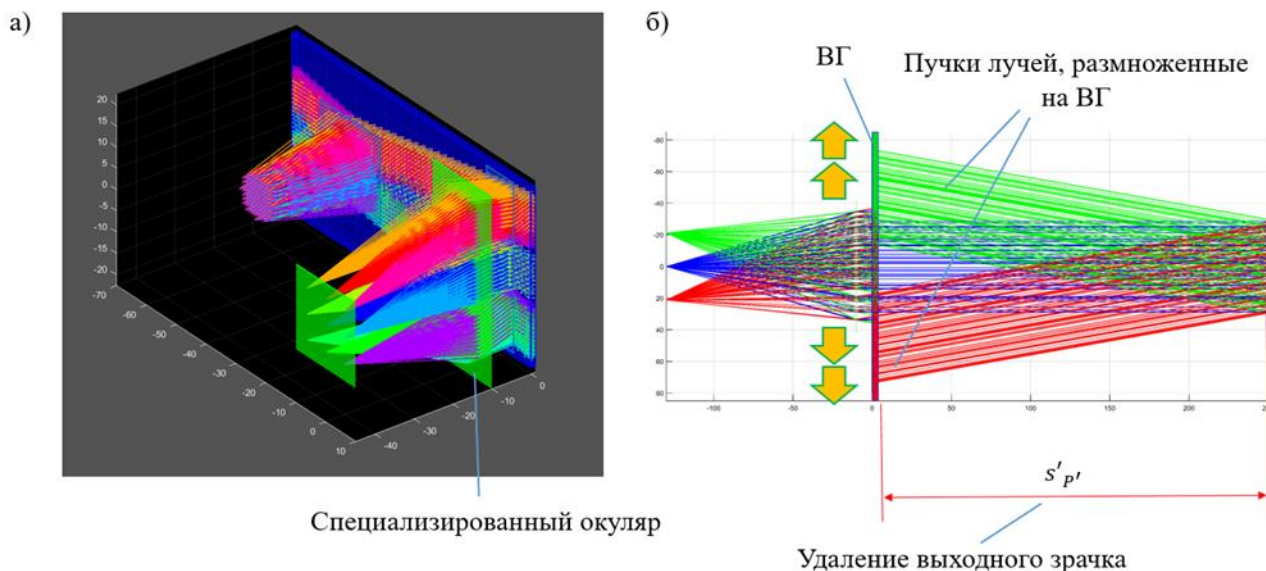


Рис. 3. Варианты двухголограммной схемы волноводного перископа

Вторым перспективным по мнению авторов направлением является использование двухголограммной схемы для мультипликации выходных зрачков обычных проекционных систем [5]. ВГ позволяет увеличить вынос (удаление) выходного зрачка $s'_{p'}$, при этом проекционная система остается достаточно компактной. Такая схема позволяет в разы уменьшить габариты собственно проекционной оптики. Хотя данное решение возможно использовать и для систем, работающих с некогерентным излучением всего видимого диапазона, более эффективным оно будет для систем, работающих с моноцветным изображением или изображением, формируемым RGB проектором.

В ходе работы был выявлен режим работы ВГ, при котором отсутствуют все другие порядки дифракции, кроме показанных на рис. 3(б). Это дополнительно позволяет увеличить суммарную световую эффективность.

Заключение

Были рассмотрены различные направления повышения световой эффективности работы волноводных голографических бим-комбайнеров в схемах дисплеев дополненной реальности. Показано, что использование трехголограммной схемы (при использовании обычных схем записи с получением одинаковых по всей площади голограммы дифракционных структур) приводит к заведомому ограничению суммарной эффективности работы бим-комбайнера. Двухголограммная же схема, несмотря на ряд недостатков, при использовании соответствующих проекционных систем и в селективных по режиму волноводной дифракции, может дать заметно большую суммарную световую эффективность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Kress B. C.** Optical architectures for augmented-, virtual-, and mixed-reality headsets. – 2020. <http://doi.org/10.1117/3.2559304>
- [2] **Rolland J.**, Cakmakci O. Head-worn displays: the future through new eyes //Optics and Photonics News. – 2009. – Т. 20. – №. 4. – С. 20-27. <http://doi.org/10.1109/JDT.2006.879846>
- [3] Kress B.C. Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations // Proc. SPIE 11062. Digital Optical Technologies. 2019. P. 110620J (16 July 2019). <http://doi.org/10.1117/12.2527680>
- [4] **Cheng D.**, Wang Q., Liu Y. et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: A review and outlook // Light: Advanced Manufacturing. 2021. V. 2. № 3. P. 350–369. <https://doi.org/10.37188/lam.2021.024>
- [5] **Putilin A. N.** et al. Device for enlarging exit pupil area and display including the same : заяв. пат. 17090999 США. – 2021.

Efficiency problems in augmented reality displays based on waveguide holograms

A. N. Putilin¹, S. E. Dubynin^{1,2}, A. V. Morozov¹, N. A. Putilin^{1,3}

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

²Samsung R&D Institute Rus (SRR), Moscow, Russia

³Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia

The work is devoted to the investigation of improving the light efficiency of augmented reality (AR) displays based on holographic waveguide non-imaging periscopes. And also considered variations in the construction of optical schemes for projectors of a virtual image. The most of the experimentally tested schemes of this type of displays are based on a three-hologram scheme with pupil multiplication along two coordinates and are characterized by very low efficiency. The authors investigated alternative optical schemes of holographic waveguide nonimaging periscopes to reduce light losses and prevent the formation of irrelevant diffraction orders. Several new schemes of AR waveguide displays have been experimentally tested.

Keywords: Holographic optical elements, Augmented reality displays, Waveguide holograms.

Искажения виртуального изображения в схемах НМД на волноводных голограммах

Н. А. Путилин^{1,2}, С. Е. Дубынин^{1,4}, А. Н. Путилин¹, С. С. Копенкин^{1,3}, Ю. П. Бородин^{1,3}

¹ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

³ МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

⁴ ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва, Россия

Одним из быстроразвивающихся направлений современной оптики являются системы дополненной и смешанной реальности. Наибольшее распространение получили системы на основе волноводных голографических перископов. При изготовлении таких перископов и период, и ориентация волноводных голограмм могут не совпадать с расчетной величиной, поэтому практически важной задачей является определение допусков на эти отклонения. Особенно актуальным данный вопрос становится при переходе к массовому производству подобных систем. В настоящей работе рассматривается влияние различных параметров волноводных голограмм, а также самих волноводов, на качество формируемого виртуального изображения. Выделен ряд характерных искажений виртуального изображения.

Ключевые слова: Дисплей дополненной реальности, волноводная голограмма, виртуальное изображение, аберрации.

Цитирование: Путилин, Н. А. Искажения виртуального изображения в схемах НМД на волноводных голограммах / Н. А. Путилин, С. Е. Дубынин, А. Н. Путилин, С. С. Копенкин, Ю. П. Бородин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 144–148.

Введение

Оптические компоненты возможно разделить на два типа – изображающие и неизображающие. Неизображающие оптические компоненты смещают лучи перпендикулярно оптической оси проектора, не изменяя при этом их направления. К таким системам относят перископические системы на основе зеркал, призм или голографических волноводов. Последние получили наиболее широкое распространение в качестве элементов совмещения виртуального и действительного изображений – бим-комбайнеров (beam combiners – BC) [1, 2]. Однако при организации производства таких компонентов важно иметь оценки влияния параметров волноводных голограмм и самих волноводов на качество формируемого изображения. Ранее рассматривались отдельные узкие технологические вопросы, однако данная тема требует дальнейшей проработки [3].

1. Искажения в двухголограммной схеме

Наиболее простой является двухголограммная схема построения волноводного голографического бим-комбайнера [4]. В этой схеме (рис. 1 а)) вводная волноводная голограмма (ВГ1) и выводная (ВГ2) представляют дифракционные решетки с постоянным и равным периодом. Лучи, дифрагировавшие под углом большим угла ПВО в волновод, при

выводе дифрагируют под тем же углом, но в обратном направлении. Это позволяет получить на выходе неискаженный параллельный пучок, который был послан на ВГ1 после проектора. При этом в данной системе отсутствуют хроматические аберрации (при выдерживании постоянных и одинаковых периодов ВГ) [5]. При этом многократность вывода позволяет получить мультиплицированный (размноженный) зрачок.

Однако если присутствуют некоторые различия в периодах ВГ1 и ВГ2, или решетки фокусируют излучение (записаны не идеально плоскими волнами), то на выходе мы получим искаженный волновые фронты. Аналогичный эффект происходит, если волновод имеет клиновидность. На рис. 2 б) для наглядности приведен пример с клиновидностью $30'$, где аберрации лучей на выходе составляют до 12° . При этом можно видеть перемешивание пучков от отдельных выводов. Трассировка выполнялась в собственной программе, разработанной на базе среды MATLAB.

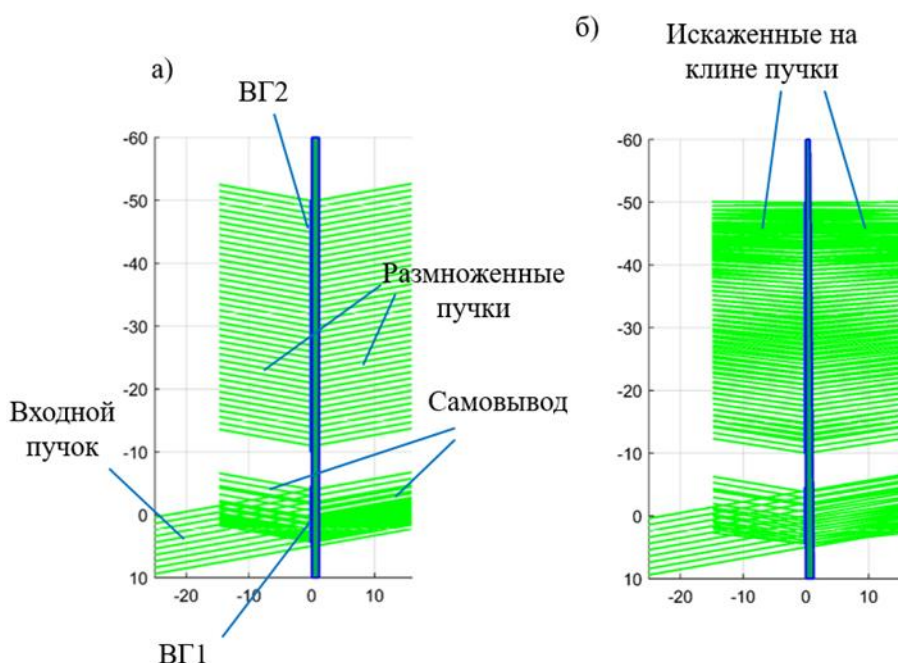


Рис. 1. Двухголограммная схема волноводного голографического перископа

Моделирование и практика показывают, что аберрации лучей на выходе на порядок превосходят величины клиновидности или иных отклонений формы и положения рабочих поверхностей волновода. Связано это с тем, что каждое переотражение усиливает возникшие угловые аберрации. На основе моделирования проводились оценки допусков на клиновидность, плоскостность, сферичность.

2. Искажения в трехголограммной схеме

Двухголограммная схема позволяет увеличить выходной зрачок только по одному направлению. При этом увеличение зрачка для неосевых пучков позволяет увеличить вынос выходного зрачка при сохранении малых габаритов проекционного объектива.

Для обеспечения компактности проекционной схемы по обоим направлениям используют трехголограммные схемы. На первой голограмме производится ввод излучения в волновод, после чего происходит мультипликация на двух голограммах по различным направлениям. Мультипликация может производиться последовательно, такая схема была использована фирмой Microsoft [1]. Большую компактность обеспечивает схема, предложенная фирмой WaveOptics [2], в ней мультипликация осуществляется на двух наложенных решетках, как показано на ри. 2 а). Вводная и выводные голограммы имеют одинаковые периоды, при этом угол γ между векторами решеток ($|\vec{D}| = 2\pi \cdot \lambda/n$) составляет $\gamma = 120^\circ$. Вектора решеток в таком случае образуют замкнутый треугольник. Схема получается, как и описанная выше, ахроматической, то есть не вносящей хроматических aberrаций. На рис. 2 в) показана система с идеальным окуляром в качестве проектора.

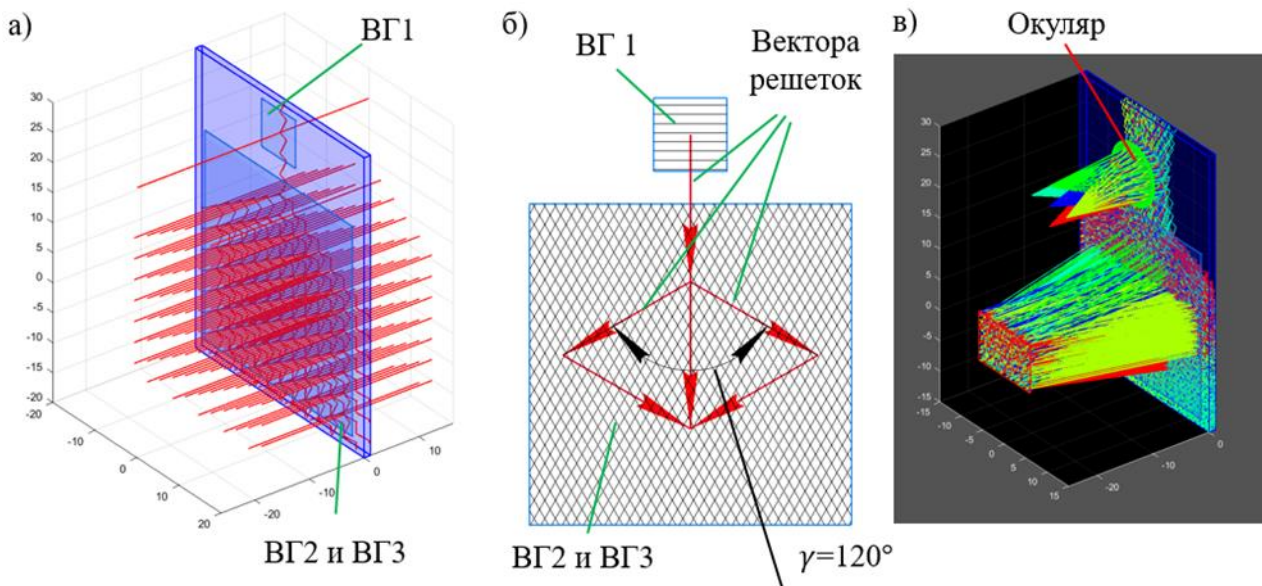


Рис. 2. Трехголограммная схема, компоновка аналогична предложенной фирмой WaveOptics

Клиновидность волновода и отклонения от постоянства периодов ВГ вносят схожее влияние с рассмотренным выше случаем двухголограммной схемы. Однако в данном случае количество переотражений кратно увеличивается, следовательно, ужесточаются требования к волноводам.

Однако существует также еще один параметр – угол γ ориентации решеток. В ходе экспериментов было установлено, что его изменение не нарушает параллельности пучков на выходе для каждого угла поля, но изменяет углы на выходе. В результате при отправке изображений в виде тестовой сетки имеем картину, показанную на рис. 3. По осям отложены угловые величины изображения.

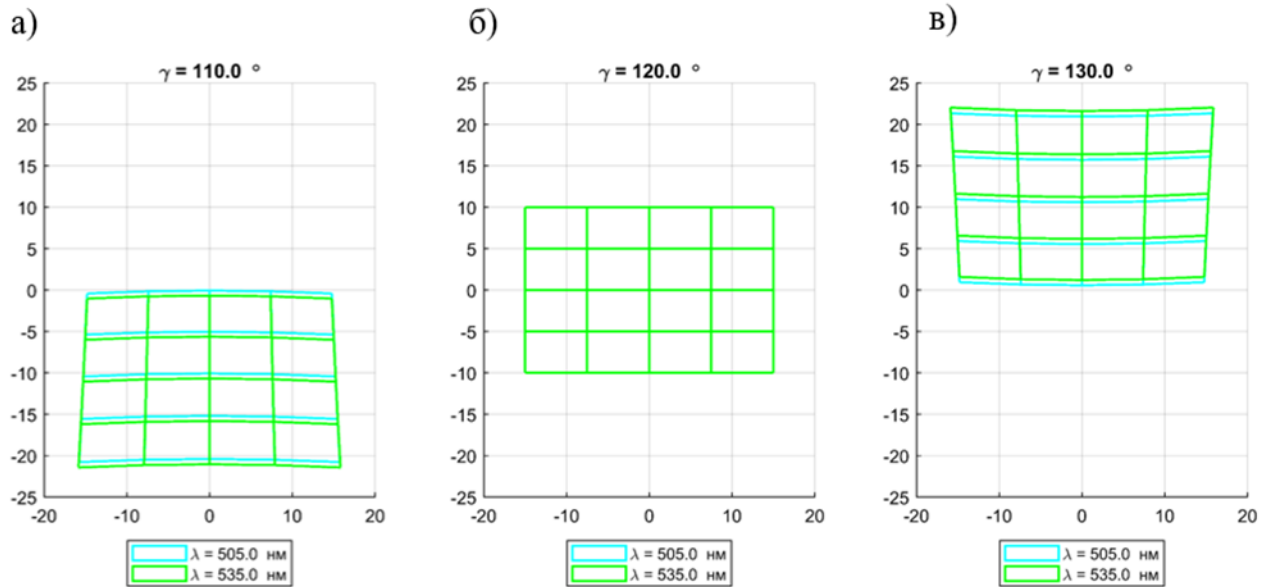


Рис. 3. Искажения изображения в схеме с наложенными решетками

В данном примере для наглядности вводились большие изменения в угол γ ($\pm 10^\circ$). Можно видеть, что сильно изменяется средний угол вывода, также примерно на $\pm 11^\circ$. То есть при нормальном падении мы получаем вывод под другим углом. В смещенном изображении, кроме того, возникает заметная дисторсия, характерная в целом для неосевых систем.

Принципиально дисторсия может быть скомпенсирована программным образом. Однако, кроме этого, нарушается условия исправления хроматизма. На рисунках показано двойное изображение, возникающие для длин волн 505 нм и 535 нм. Это говорит о невозможности получения высокоразрешающих виртуальных изображений при использовании полихроматического источника излучения.

Заключение

Приведен анализ искажений, возникающих в виртуальном изображении из-за отклонения формы волновода от идеальной, а также из-за погрешностей параметров записи волноводных голограмм. Выявлены характерные искажения для трехголограммной схемы с наложенными дифракционными решетками.

Список источников

- [1] Kress B. C., Chatterjee I. Waveguide combiners for mixed reality headsets: a nanophotonics design perspective // Nanophotonics. 2020. V. 10. № 1. P. 41–74. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0410
- [2] Cheng D., Wang Q., Liu Y. et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: A review and outlook // Light: Advanced Manufacturing. 2021. V. 2. № 3. P. 350–369. DOI: 10.37188/lam.2021.024.
- [3] Solomashenko A., Kuznetsov A., Nikolaev V. et al. Development of a holographic waveguide with thermal compensation for augmented reality devices // Applied Sciences. 2022. V. 12. № 21. P. 11281. DOI: 10.3390/app122111281.

- [4] Shin B., Kim S., Druzhin V. et al. Eye-box expansion using waveguide and holographic optical element for augmented reality head-mounted display // *Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR)*. SPIE. 2020. V. 11310. P. 142–147.
DOI: 10.1117/12.254477.
- [5] Putilin A.N., Morozov A.V., Kopenkin S.S. et al. Holographic waveguide periscopes in augmented reality displays // *Optics and Spectroscopy*. 2020. V. 128. № 11. P. 1828–1836.
DOI: 10.1134/s0030400x2011020x.

Aberrations of the virtual image in HMD based on waveguide holograms

N. A. Putilin^{1,2}, S. E. Dubynin^{1,4}, A. N. Putilin¹, S. S. Kopenkin^{1,3}, Y. P. Borodin^{1,3}

¹ Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

² Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia

³ MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

⁴ Samsung R&D Institute Rus (SRR), Moscow, Russia

Augmented and mixed reality systems are one of the rapidly developing areas of modern optics. The most widely used systems are based on waveguide holographic periscopes. They are classified as non-imaging optical system, that shifts the optical axis, without changing the direction of the beams. During the recording step both the period and the orientation of waveguide holograms may not coincide with the calculated value; therefore, determining the tolerances for these deviations is a practically important task. In this paper, we consider the influence of various parameters of waveguide holograms and waveguides themselves, on the quality of the formed virtual image. A number of characteristic distortions of the virtual image are identified.

Keywords: Augmented reality display, Waveguide hologram, Virtual image, Aberrations.

Фазовый модулятор света для голографической проекции

Ю. П. Гуцо

Общество с ограниченной ответственностью НаноРельеф Дисплей, IT кластер Сколково и Московский инновационный кластер.

На базе фазовых перестраиваемых дифракционных решеток, разработанных нашей компанией, предложены три варианта электрооптического фазового модулятора света Рельеф. Модулятор может работать на отражение с помощью диэлектрического зеркала или с применением призмы полного внутреннего отражения. Кроме того, в докладе представлен вариант модулятора с вогнутой отражающей поверхностью. Такая конструкция модулятора позволяет сократить оптический путь голографического проектора и уменьшить габариты устройства. При введении в носитель записи Фурье-голограммы изображения кадра можно с помощью когерентного излучения получить голографическое представление информации известными методами. Используя фазовые модуляторы света, можно записать Фурье-голограммы, создавая систему терабайтной памяти. В сообщении подробно рассмотрены характеристики пространственного модулятора света Рельеф и возможные области применения.

Ключевые слова: Оптика, Голография, Дифракционные оптические элементы, Фазовые перестраиваемые дифракционные решетки.

Цитирование: Гуцо, Ю. П. Фазовый модулятор света для голографической проекции / Ю. П. Гуцо // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 149–154.

Принцип действия LMR

Принцип действия электрооптического фазового модулятора света Рельеф, для которого принято международное сокращение LMR (Light Modulator Relief), основан на преобразовании электрического сигнала в геометрический рельеф на прозрачном диэлектрическом гелеобразном слое. Конструкция LMR подобна жидкокристаллическим модуляторам света LCD, как показано на рис. 1. Это существенно облегчает запуск производственного процесса для LMR.

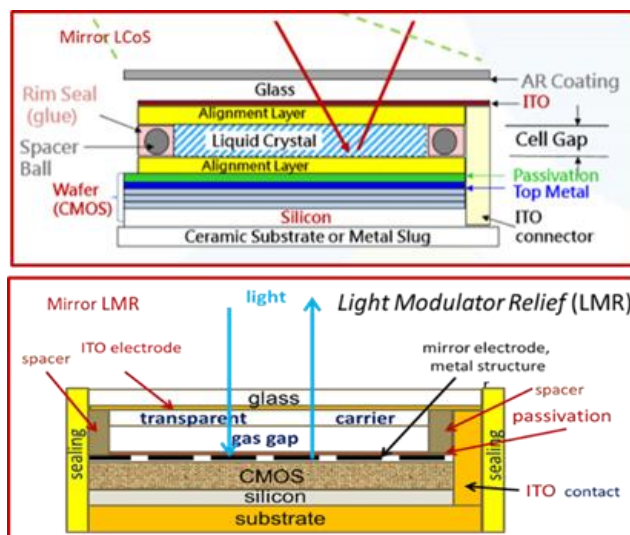


Рис. 1. Сопоставление конструкций жидкокристаллического модулятора и LMR

Для определения режима оптимальной работы LMR нами было решён цикл краевых задач физики [1]. Анализ полученных результатов даёт возможность определить рабочие параметры модулятора и его применений (рис. 2) [2–14].

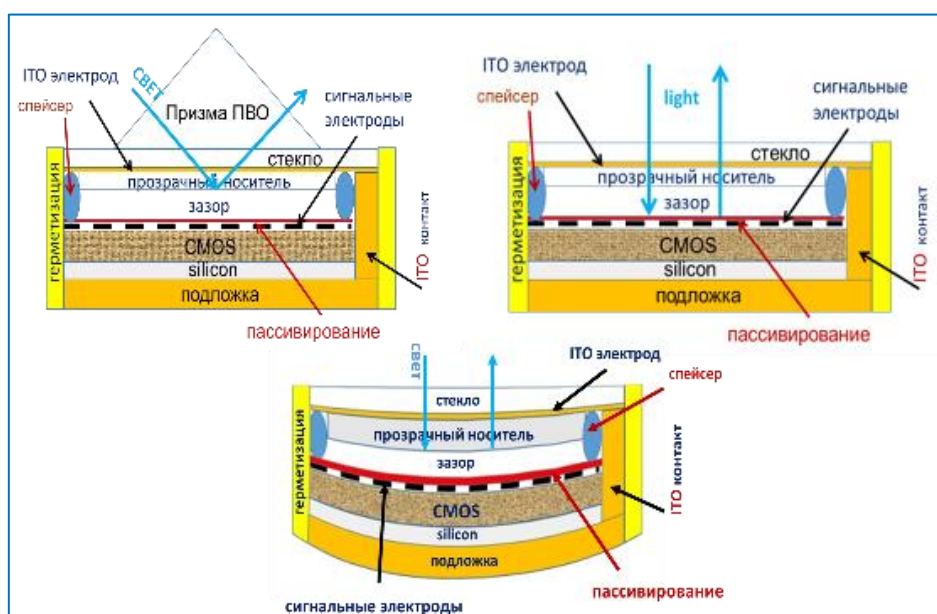


Рис. 2. Три варианта конструкции LMR

Модулятор LMR представляет – электрооптический чип, в котором производство носителя – точный автоматизированный процесс смешения четырех компонентов. Все процессы требуют чистых помещений. Для простых модификаций LMR часть процессов может быть совершена в ручном режиме с увеличением процента брака и времени, снижением производительности, но с уменьшением CAPEX производственного оборудования. Это приемлемо, в частности, для сектора лазерного освещения.

Как видно из рассмотрения рис. 3 и рис. 4, нами разработана новая технология фазовой модуляции световой волны на основе перестраиваемых фазовых дифракционных решеток с

экспериментальной дифракционной эффективностью 98,6% и частотой переключения информации до 0.5 МГц. Технология защищена 126 патентами.

Используемые известные технологии модуляции света достигли предела из-за физических ограничений. Вследствие этого соотношение цена/качество в дальнейшем не будет улучшаться. Именно поэтому на рынках уже в течение 10-12 лет отсутствуют адекватные по параметрам приборы форм-факторов Микро и Пико. В ближайшие 10 лет с помощью LMR наша компания надеется на технологический прорыв в области электрооптических модуляторов излучения.

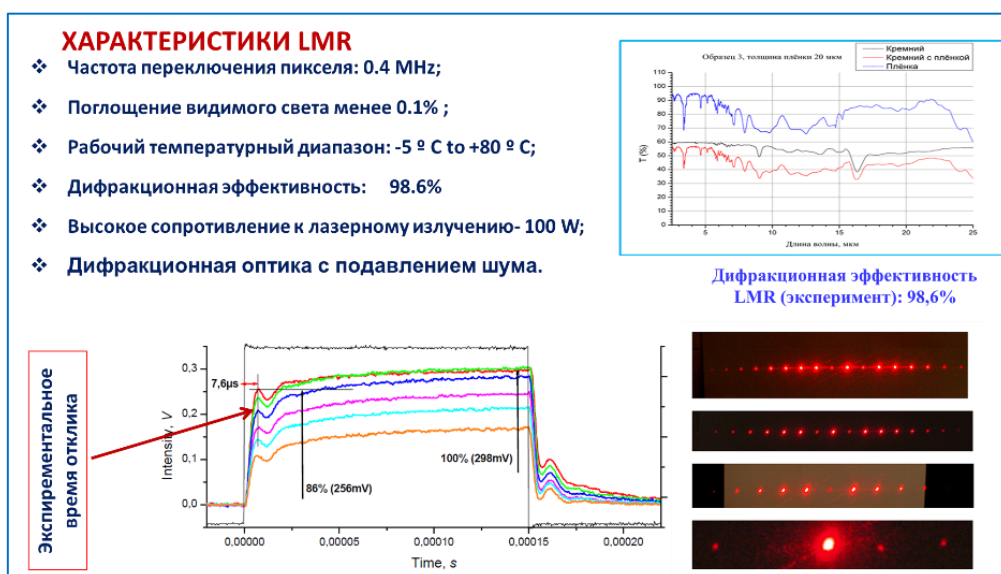


Рис. 3. Характеристики LMR

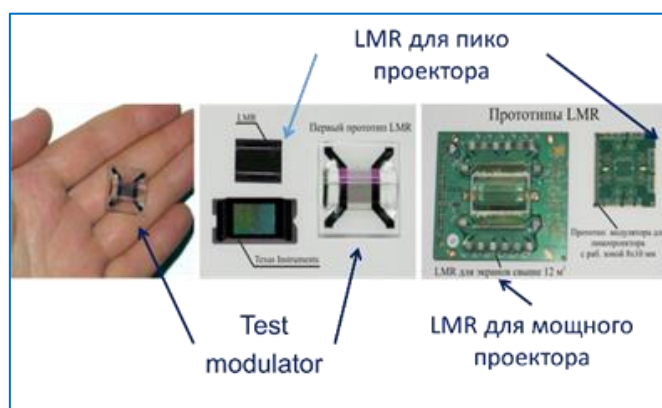


Рис. 4. Экспериментальные образцы LMR

Основные используемые технологии модуляции света основаны на делении рабочей поверхности модулятора на множество (массив) микрзеркал (MEMS, DMD) и отличаются низким быстродействием, наличием подвижных частей, применением рассеивающей оптики, низким КПД преобразования входного излучения в полезный световой поток, отсутствием возможности фильтрации шумов выходного сигнала. В целом указанные

обстоятельства приводят к созданию дорогих, габаритных, ненадежных устройств и к экономическим противоречиям в плане отношения цена/качество.

В качестве иллюстрации наших возможностей, мы рассчитали вариант пикопроектора с лазерными источниками света с позиции получения максимальной яркости при применяемой стандартной мощности источника питания 3 Вт. Как показано на рис. 5, увеличение светового потока в 10 раз не сопровождается увеличением мощности источника питания [10, 13].

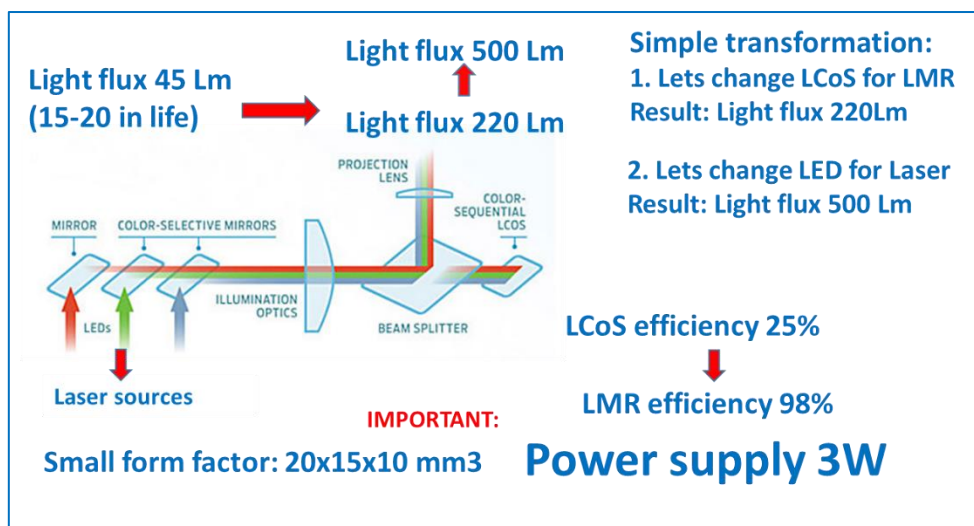


Рис. 5. Расчетный рекордный световой поток (500Lm) пико проектора с LMR и лазерными источниками при стандартной мощности источника питания 3 Вт

Следует отметить, что кроме голографической проекции и создания голографической терабайтной памяти на основе Фурье-голограмм, существует достаточно большой спектр применения LMR. К таким применениям относятся: лазерные проекторы большой и малой мощности; сканеры без подвижных частей и лидары без подвижных частей [2, 4, 6–9, 11], двухсторонняя оптическая связь [3, 5, 12, 14]; осветительные приборы четвертого поколения; полиграфия; солнечно-слепые панели (система, не имеющая аналогов в мире), бинокулярный стереоскопический дисплей в очках; стереоскопический дисплей в скафандре; виртуальный дисплей; Head-Up типов: «See-through», «See-around» и «Full-immersion».

Заключение

Предлагаемый нами электрооптический пространственный модулятор LMR на перестраиваемых фазовых дифракционных решетках имеет практически предельно возможную дифракционную эффективность 98,6%. Это дает принципиальные преимущества на рынке на длительный срок и позволяет создавать надежные дешевые твердотельные устройства с малыми масс-габаритными показателями, без подвижных частей.

Особо следует подчеркнуть, что LMR не имеет четких границ пикселя, из-за которых сложно подавить уровень шума при использовании лазерных источников света в известных зеркальных электрооптических модуляторах.

НИОКР завершены. LMR реализован в опытном производстве – произведено 200 модуляторов в технопарке Дортмунда. Установлены и подтверждены рабочие параметры модулятора. Отработана базовая технология. Оценочно уровень готовности – УГТ6. Проект готов к реализации в одном из секторов. Потребуется ОКР для конкретных моделей.

Разработанной нами новый класс модуляторов, не имеющий аналогов в мире, следует запустить в серийное производство как типовой набор нескольких вариантов LMR, закрывающих наиболее актуальные области применения такие как: лидары, обычные пико проекторы, голографические проекционные устройства и голографическая запись информации, устройства дополненной реальности, источники света четвертого поколения, элементы волоконной коммуникации, односторонняя и двухсторонняя оптическая связь и др.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры «Оптоэлектронных устройств и систем» Российского Технологического Университета (МИРЭА), фондам: Бортника, Роснано, Технополису Дортмунда и Инновационному Центру Сколково за финансовую помощь и аппаратную поддержку высокотехнологических работ по исследованию экспериментальных характеристик LMR.

Список источников

- [1] **Гущо, Ю. П.** Физика рельефографии / Ю. П. Гущо – М.: Наука, 1999 — 526 с.
- [2] **Патент № 2 690 990 РФ.** Лидар без подвижных частей / Ю. П. Гущо, А. В. Бурага, М. А. Гущо. — Оpubл. 07.07.2019.
- [3] **Гущо, Ю. П.** Communication with landing spacecraft via asymmetrical free-space optical system based on modulating retroreflector / Nikita Zivenko, Alexey Manyak, Oleg Strukov, Vladimir Kuznetsov // Advances in the Astronautical Sciences Series - 2nd IAA-AAS Conference on Space Flight Mechanics. – 2019. – P.7.
- [4] **Патент № 2 680 655 РФ.** Дифракционный лидар / Ю. П. Гущо, М. А. Гущо. — Оpubл. 25.02.2019.
- [5] **Патент № 2 687 989 РФ.** Оптическая система связи / Ю. П. Гущо, А. В. Бурага, М. А. Гущо, О. Н. Зивенко. — Оpubл. 16.05.2019.
- [6] **Патент № 2 690 537 РФ.** Фазированный лидар / Ю. П. Гущо, А. В. Бурага, М. А. Гущо, В. В. Кузнецов. — Оpubл. 04.06.2019.
- [7] **Патент № 2 756 987 РФ.** Компактный лидар / Ю. П. Гущо, М. А. Гущо. — Оpubл. 08.10.2021.
- [8] **Патент № 2 759 260 РФ.** Лидар / Ю. П. Гущо, М. А. Гущо. — Оpubл. 11.11.2021.
- [9] **Гущо, Ю. П.** Фазированный лидар / В. В. Кузнецов, К. В. Шабельник // Международная научно-техническая конференция Оптические технологии, материалы и системы // Оптотех-2021 // Сборник докладов ИПТИП РТУ МИРЭА — под ред. А. С. Сигова — М.: РТУ МИРЭА, С. 370.
- [10] **Гущо, Ю. П.** Об одном способе температурной стабилизации фазированных перестраиваемых дифракционных решеток / Н. О. Зивенко, В. В. Кузнецов, А. П. Маняк, М. А. Гущо // Российская научно-техническая конференция «Инновационные технологии в электронике и приборостроении» — 05.04.2021-12.04.2021.

- [11] **Гущо, Ю. П.** Технология для разработки лидаров нового поколения / В. В. Кузнецов, М. А. Гущо // Российская научно-техническая конференция «Инновационные технологии в электронике и приборостроении» — 05.04.2021-12.04.2021.
- [12] **Гущо, Ю. П.** Робототехническое управление медучреждением / В. В. Кузнецов, Н. О. Зивенко // Российская научно-техническая конференция РНТК ФТИ — 16-17 апреля 2020, с. 5.
- [13] **Гущо, Ю. П.** HUD устройство дополненной реальности на базе фазового модулятора света «Рельеф» / В. В. Кузнецов, Н. О. Зивенко, А. П. Маняк // Электронная VIII Научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Фотосенсорика: новые материалы, технологии, приборы, производство» — 07 февраля 2019, с. 4.
- [14] **Гущо, Ю. П.** Устройство передачи информации по открытому оптическому каналу на базе фазового модулятора света «Рельеф» / В. В. Кузнецов, А. П. Маняк // VIII Научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Фотосенсорика: новые материалы, технологии, приборы, производство» — 07 февраля 2019, с. 6.

Phase light modulator for holographic projection

Yury Gushcho, Dr.Si., prof.

NanoRelief Display Limited Liability Company, Skolkovo IT Cluster and the Moscow Innovation Cluster

Based on the phase-tunable diffraction gratings developed by our company, we propose three variants of the electro-optical phase light modulator Relief LMR (LMR). The modulator can operate on reflection using a dielectric mirror or using a prism of total internal reflection. In addition, a variant of the modulator with a concave reflective surface is presented. This design of the modulator makes it possible to reduce the optical path of the holographic projector and to reduce the size of the device. By introducing a Fourier-hologram image of a frame into the recording medium, it is possible to obtain a holographic representation of information by known methods using coherent radiation. Using phase modulators of light, it is possible to record Fourier-holograms of the image on a carrier, creating a system of terabyte memory. In the communication the characteristics of the spatial light modulator Relief are discussed in detail.

Keywords: Optics, Holography, Diffractive optical elements, Phase-tunable diffractive gratings.

Высокопреломляющие стекла для устройств дополненной реальности

Р. О. Алексеев, В. И. Савинков, В. Н. Сигаев

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия

Высокопреломляющие стекла являются неотъемлемой частью передовых устройств оптики и фотоники, позволяя существенно оптимизировать оптические схемы и повышать качество изображения (разрешение, контрастность, яркость). Проблемы в изготовлении полноценных оптических элементов из высокопреломляющих стекол связаны с технологическими трудностями их получения и широкой вариацией составов. Разработаны составы и технология получения высокопреломляющих ($n_d = 1,8-1,9$) лантан-содержащих оптических стекол для применения в качестве элементов в устройствах оптики и фотоники, в частности, для устройств дополненной реальности.

Ключевые слова: Оптическое стекло, Показатель преломления, Устройства дополненной реальности, Оптика, Фотоника.

Цитирование: Алексеев, Р. О. Высокопреломляющие стекла для устройств дополненной реальности / Р. О. Алексеев, В. И. Савинков, В. Н. Сигаев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 155–156.

Величина показателя преломления материалов, используемых в оптических приложениях, является определяющим фактором выбора того или иного материала. С точки зрения достижения различных значений показателя преломления стекло представляется наиболее оптимальным материалом, из-за возможности широкой вариации химического состава. Стекла с высоким показателем преломления чаще других используются для создания передовых устройств дополненной реальности, позволяя существенно оптимизировать схему устройств, увеличить поле зрения и повысить качество формируемого изображения (разрешение, контрастность, яркость). Тем не менее, изготовление габаритных изделий из высокопреломляющих стекол связаны с технологическими трудностями их получения, такими как повышенная склонность к кристаллизации, удаление газовых включений, достижение высокой степени однородности и т.д. Этим обусловлена необходимость поиска новых составов высокопреломляющих стекол и разработки технологии их получения.

Представлены результаты разработки многокомпонентных составов стекол на основе систем $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ и $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-B}_2\text{O}_3$ с высоким содержанием нестеклообразующих компонентов (>40 мол.%). Для разработанных составов достигнуты высокие значения показателя преломления от 1,81 до 2,04 и относительно невысокой плотностью — менее 5 г/см³. Разработана экспериментальная технология синтеза многокомпонентных высокопреломляющих стекол, которая обеспечивает получение оптического стекла при варке в малом объеме стекловаренного сосуда (до 1 л). Оценка оптических параметров полученного стекла в соответствии с ГОСТ 23136-93 «Материалы

оптические. Параметры» показала, что стекло характеризуется 2-й категорией бессвильности и 2-й категорией пузырности, что говорит о достаточно высокой степени однородности и качестве стекла. Подобная технология синтеза стекла в последствие может быть адаптирована под новые составы высокопреломляющих лантан-содержащих стекол, в результате чего будет возможно получать стеклянные заготовки оптического качества в условиях миниатюризованного производства.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Договор №182ГССС15-L/78518).

High refractive index glasses for AR-devices

R. O. Alekseev, V. I. Savinkov, V. N. Sigaev

Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russia

High refractive index glasses are an integral part of advanced optics and photonics devices. They significantly optimize optical designs and improve image quality (resolution, contrast, brightness). Problems in the manufacture of bulk optical elements from high refractive index glasses are associated with technological difficulties in their production and a in wide variation in compositions. The compositions and technology have been developed in order to obtain high refractive index ($n_d = 1.8-1.9$) lanthanum-containing optical glasses for use as elements in optics and photonics devices, in particular, for augmented reality (AR) devices.

Keywords: Optical glass, Refractive index, AR-devices, Optics, Photonics.

Медико-психологические особенности деятельности человека в виртуальной среде

Д. В. Глухов, С. А. Калинина, А. Г. Меркулова

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н. Ф. Измерова», Москва, Россия

В статье проведен анализ влияния виртуальной реальности на функциональное состояние и здоровье человека. Изучены основные негативные симптомы и эффекты, вызванные виртуальной реальностью. Рассмотренные вопросы формируют направления для дальнейших исследований в области медико-психофизиологического, психологического взаимодействия человека и виртуальной среды с целью улучшения эргономики аппаратно-программного комплекса VR-систем для устранения или уменьшения риска развития побочных эффектов или степени их воздействия.

Ключевые слова: Виртуальная реальность, Функциональное состояние, Киберболезнь, Эргономика.

Цитирование: Глухов, Д. В. Медико-психологические особенности деятельности человека в виртуальной среде / Д. В. Глухов, С. А. Калинина, А. Г. Меркулова // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 157–160.

Исследования последних десятилетий показали, что использование технологий виртуальной реальности улучшает процесс обучения, повышает креативность и вовлеченность в деятельность. Однако нахождение в иммерсивных средах может оказывать негативное воздействие на организм и психику человека.

Для максимально естественного восприятия виртуальной среды VR-система должна воздействовать на все органы чувств человека. Основной объем воспринимаемой информации поступает через зрительный анализатор, поэтому состояние пользователя напрямую зависит от характеристик дисплея.

Основными факторами, от которых зависит качество дисплея, являются [1]:

1. Пространственное разрешение. Плотность пикселей на дисплее должна быть такой, чтобы пользователь не воспринимал их отдельно друг от друга.

2. Диапазон яркости. Весь диапазон яркостей, которые зрительный механизм человека способен воспринять, огромен: от 10^{-6} кд/м² для глаза, полностью адаптированного к темноте, до 10^6 кд/м² для глаза, полностью адаптированного к свету. Современные дисплеи имеют только 256 возможных численных значений яркости, что также не соответствует естественному восприятию, а переход к зрительному восприятию объектов человеческим глазом при низких уровнях внешней освещенности не представляется возможным.

3. Частота обновления пикселей на дисплее. Требуется более высокая частота кадров по сравнению со стандартами телевидения или кино. При увеличении частоты кадров до 90 побочные эффекты исчезают почти у всех пользователей.

Изображение, формируемое на дисплее, может вызвать конфликт вергенции и аккомодации глаз. Виртуальный мир воспринимается пользователем на мнимом удаленном расстоянии, а на самом деле он находится на дисплее, находящемся на неизменном расстоянии не более 15 см от глаз, что может привести к дополнительному напряжению зрительного анализатора и усталости после длительного использования VR, так как для сохранения четкого изображения на сетчатке вергенция должна происходить при неизменной аккомодации [2]. Хотя работа в виртуальной среде не влияет на рефракцию и бинокулярное зрение (стабильность взгляда, стереопсис и амплитуду аккомодации), после воздействия VR может наблюдаться утолщение хориоидеи. Утолщение сосудистой оболочки характерно для миопической дефокусировки, которая приводит в дальнейшем к развитию дальнозоркости. Часто наблюдается миопический сдвиг более 0,5 диоптрий, но изменения проходят в течение часа после прекращения работы в VR. Использование шлемов виртуальной реальности (HMD) приводит к значительному уменьшению частоты моргания глаз, вследствие чего может развиваться кератит и синдром сухого глаза [3].

Кроме того, на состояние пользователя оказывает сильное воздействие задержка зрительного сигнала. Даже если она незаметна на сознательном уровне, она является одним из ведущих факторов развития киберболезни.

Со зрительной системой тесно связан вестибулярный аппарат: вместе со зрительной и двигательной рецепторными системами он играет ведущую роль в ориентации человека в пространстве. Пренебрежение физиологией вестибулярной системы при разработке VR-систем приводит к рассогласованию воспринимаемых сигналов. На сегодняшний день нет специального устройства, способного передавать вестибулярные сигналы, стимулирующие вестибулярный аппарат до требуемых значений. При неправильном функционировании системы некоторые люди могут испытывать головокружение, тошноту, рвоту, потливость и затруднения при ходьбе.

Одним из основных негативных воздействий VR является несоответствие визуальных и вестибулярных сигналов, которое возникает из-за кажущегося собственного движения в VR (векции) при неподвижности тела в реальном мире: зрительный анализатор передает сигнал в головной мозг об ускорении, а орган равновесия — об отсутствии реального движения.

Нахождение в виртуальной среде приводит также к психофизиологическим и нейрофизиологическим изменениям в организме пользователя. Пребывание в VR-среде может снижать скорость реакции и когнитивных функций в целом и приводить к изменению частоты сердечных сокращений. Кроме того, пребывание в VR-среде влияет на мозговой кровоток, увеличивает концентрацию оксигемоглобина в мозговом кровотоке, мощность сигналов ЭЭГ, связи между областями мозга, отвечающими на стимулы, и активность областей мозга, отвечающими за формирование тошноты [4].

Кроме умственного утомления у пользователей VR-сред также может развиваться и физическое утомление из-за интерфейса, требующего больших мышечных усилий, а также веса гарнитур. Большинство VR-гарнитур имеют вес от 450 до 650 г и спроектированы так,

что большая часть этого веса приходится на лицо, что является неэргономичным решением: гарнитура тянет голову вперед и вниз, создавая дискомфорт в шейном отделе при длительном ношении, а также давит на нос, скулы и лоб [5]. Нахождение в VR-среде в устройствах HMD также приводит к тому, что пользователям трудно сохранять устойчивое положение при ходьбе [6].

Ещё одной проблемой, связанной с использованием VR-гарнитур, является вопрос гигиены и возможное развитие дерматологических заболеваний. В имеющихся гарнитурах обычно используют ткань, поролон и текстильные застежки. Санитарная обработка этих материалов дезинфицирующими средствами является большой проблемой [7].

На сегодняшний день исследователи для обозначения комплекса побочных эффектов используют определение «симптомы и эффекты, вызванные виртуальной реальностью (virtual reality-induced symptoms and effects, VRISE)» [8]. К ним относятся: киберболезнь, зрительное и мышечное утомление, острый стресс и умственное переутомление. Некоторые авторы предлагают использовать определение «синдром VR-дезадаптации» [1].

Наиболее изученным VRISE является киберболезнь. Ее физиологические проявления - (потливость, тошнота, бледность кожи и учащенное сердцебиение) отражают нейроэндокринную стрессовую реакцию [9].

Компании-разработчики часто заявляют о решении технических и аппаратных проблем, вызывающих «Болезнь виртуальной реальности», однако при этом игнорируют следующее противоречие: если гарнитура лучше с точки зрения пространственного разрешения, частоты кадров, точности отслеживания, поля зрения и задержки сигнала, то вероятность плохого самочувствия пользователей будет выше по причине векции и других несопадающих сигналов. Если сенсорные сигналы от дисплеев виртуальной реальности становятся сильнее и более точно имитируют реальные, то мозг пользователя отчетливее воспринимает сенсорный конфликт между ощущениями от реального и виртуального мира.

Несмотря на интенсивное внедрение технологии индустрии 4.0 вопросы воздействия системы VR на организм и психические процессы пользователя, развитие «синдрома VR-дезадаптации», а также последствия пребывания человека в различных вариантах смешанной реальности, особенности их использования и формирующиеся при этом побочные эффекты остаются открытыми. Поэтому крайне актуальной является необходимость разработки:

- 1) методик оценки влияния VR на человека;
- 2) эргономичных средств аппаратного обеспечения;
- 3) требований к санитарно-гигиеническим характеристикам оборудования;
- 4) критериев отбора пользователей для работы в VR (пол, возраст, состояние здоровья и др.);
- 5) условий использования VR-систем (длительность нахождения в виртуальной среде, особенности окружающего пространства и др.);
- 6) процессов адаптации и тренированности пользователей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **LaValle, S. M.** Virtual reality / S. M. LaValle. — Cambridge University Press, 2019. — 426 p.
- [2] **Shibata, T.** The zone of comfort: predicting visual discomfort with stereo displays / T. Shibata, J. Kim, D. M. Hoffman, M. S. Banks // Journal of Vision. — 2011. — Vol. 11. — № 8. — P. 1-29. — DOI:10.1167/11.8.11.
- [3] **Kim, J.** Change of Blink Rate in Viewing Virtual Reality with HMD / J. Kim, K. Sunil, J. Yoo, S. Kwon // Symmetry. — 2018. — Vol. 10. — № 9. — P. 400. — DOI:10.3390/sym10090400.
- [4] **Kourtesis, P.** Validation of the Virtual Reality Neuroscience Questionnaire: Maximum Duration of Immersive Virtual Reality Sessions Without the Presence of Pertinent Adverse Symptomatology / P. Kourtesis, S. Collina, L. Doumas, S. MacPherson // Front. Hum. Neurosci. — 2019. — Vol. 13. — P. 417. — DOI:10.3389/fnhum.2019.00417.
- [5] **Yan, Y.** The effects of weight on comfort of virtual reality devices / Y. Yan, K. Chen, Y. Xie, Y. Song, Y. Liu // International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Springer, Cham, 2018. — P. 239-248. — DOI:10.1007/978-3-319-94706-8_27.
- [6] **Chan, Z.** Walking with head-mounted virtual and augmented reality devices: Effects on position control and gait biomechanics / Z. Chan, A. MacPhail, I. Au, J. Zhang, B. M. Lam, R. Ferber // PLoS ONE. — 2019. — Vol. 14. — № 12. — P. e0225972. — DOI:10.1371/journal.pone.0225972.
- [7] **Lutz, O.** Application of head-mounted devices with eye-tracking in virtual reality therapy / O. Lutz, C. Burmeister, L. dos Santos, N. Morkisch, C. Dohle, J. Krüger // Current Directions in Biomedical Engineering. — 2017. — Vol. 3. — № 1. — P. 53-56. — DOI:10.1515/cdbme-2017-0012.
- [8] **Souchet, A. D.** Design guidelines for limiting and eliminating virtual reality-induced symptoms and effects at work: a comprehensive, factor-oriented review / A. D. Souchet, D. Lourdeaux, J. M. Burkhardt, P. A. Hancock // Frontiers in Psychology. — 2023. — Vol. 14. — P. 1161932. — DOI:10.3389/fpsyg.2023.1161932.
- [9] **Ohyama, S.** Autonomic responses during motion sickness induced by virtual reality / S. Ohyama, S. Nishiike, H. Watanabe, K. Matsuoka, H. Akizuki, N. Takeda // Auris Nasus Larynx. — 2007. — Vol. 34. — P. 303-306. — DOI:10.1016/j.anl.2007.01.002.

Medical and psychological features of human activity in virtual environment

D. V. Glukhov, S. A. Kalinina, A. G. Merkulova

FSBSI «Izmerov Research Institute of Occupational Health», Moscow, Russia

The article analyzes the influence of virtual reality on functional state and human health. The main negative symptoms and effects caused by virtual reality are studied. The considered questions form directions for further research in the field of medical-psychophysiological, psychological interaction between a person and virtual environment in order to improve the ergonomics of hardware-software complex of VR-systems to eliminate or reduce the risk of side effects or the degree of their impact.

Keywords: Virtual Reality, Functional state, Cybersickness, Ergonomics.

Анализ цветового контраста в HUD, системах дополненной реальности

А. М. Березовик¹, А. А. Степанов²,

¹ ООО «Дисплей Гласс», Минск, Беларусь

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Данная статья посвящена методике расчёта цветового контраста для различных яркостей изображения на HUD, системах дополненной реальности, обеспечивающих требуемое качество изображения, учитывающее порог цветового отличия. Методика основана на определении зависимостей цветовых отличий, обусловленных фоном (естественного дневного света, голубого неба, песков пустыни) и цветом изображения от яркости фона и изображения красного, зеленого и синего свечения. Рассчитанные значения яркости изображения для HUD, систем дополненной реальности могут быть использованы при проектировании систем отображения информации дополненной реальности.

Ключевые слова: HUD, Системы дополненной реальности, Восприятие цвета, Цветовой контраст.

Цитирование: **Березовик, А. М.** Анализ цветового контраста в HUD, системах дополненной реальности / А. М. Березовик, А. А. Степанов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 161–165.

Введение

Во время пилотирования пилоту необходимо одновременно анализировать и учитывать информацию, поступающую из окружающего пространства и многочисленных приборов. По этой причине HUD, системы дополненной реальности широко используются во многих моделях самолётов. HUD, системы дополненной реальности – это системы отображения, которые отображает навигационно-пилотажную и специальную информацию через лобовое стекло, не требуя от пилота отвода взгляда от их обычных положений обзора. Пилоты могут просматривать информацию, глядя вперед, а не под углом вниз, глядя на нижнюю панель приборов. HUD, системы дополненной реальности также имеют преимущество, заключающееся в том, что глазу пилота не нужно перефокусироваться, чтобы видеть окружающее впереди пространство после того, как он посмотрел на оптически более близкие приборы [1].

Однако изображения, проецируемые на HUD, системы дополненной реальности, всегда накладываются на реальный окружающий фон. Если символы, отображаемые на HUD, системы дополненной реальности, имеют тот же цвет, что и фон, пилоты не смогут считать информацию с HUD, систем дополненной реальности. Очевидно, что видимость (считываемость) должна быть улучшена, учитывая фон и его яркость. Видимость изображения на HUD, системах дополненной реальности должна быть гарантирована в различных условиях, чтобы пилоты могли сразу распознавать информацию. Цвет изображения на HUD, системах дополненной реальности будет изменяться в зависимости от

фона и его яркости. В частности, видимость может ухудшиться при изменении яркости: при её увеличении доминировать будут цвета окружающего пространства, выступающее в качестве фона для HUD, систем дополненной реальности, тем самым уменьшая цветовой контраст изображения (небо, прямая солнечная засветка, засветка от освещения ВПП, пески пустыни и т.д.).

Таким образом, анализ влияния фона и его яркости на видимость изображения (цветовой контраст), формируемого на HUD, системах дополненной реальности, а также методы её улучшения представляют актуальную задачу, решению которой посвящена настоящая статья. Мы предлагаем метод анализа видимости изображения, учитывающий порог чувствительности цветового отличия, а также её улучшение за счёт определения необходимой яркости изображения. Усовершенствованные источники света, такие как светодиоды и лазерные диоды, позволяют проецировать изображение большего размера на лобовое стекло самолета, обеспечивая его видимость в истинном цвете даже в условиях внешней засветки.

1. Постановка задачи

Так как формирование изображения происходит на прозрачном экране HUD, систем дополненной реальности (комбинере), то возникает ситуация для оптического смешения цветов, т.е. происходит наложение световых потоков различных цветов, одновременно идущих от фона и жидкокристаллического формирователя изображения (ЖКФИ) (см. рис. 1).

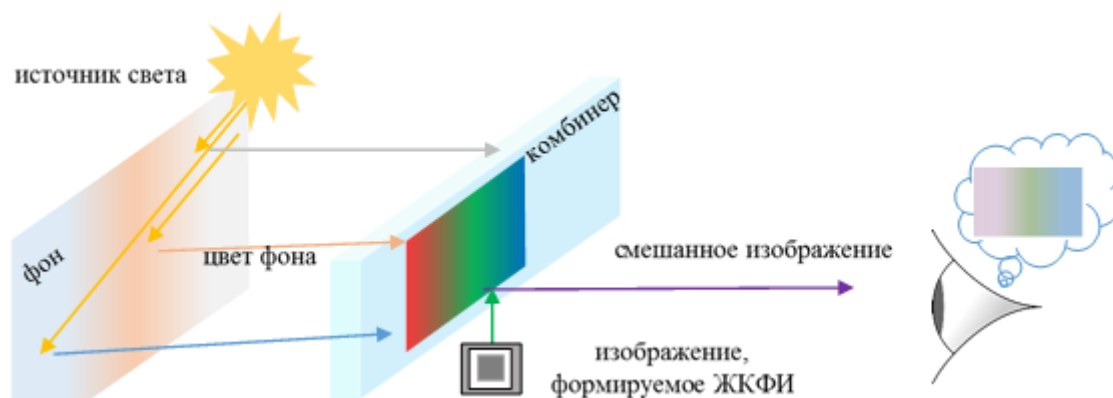


Рис. 1. Иллюстрация причины оптического смешения цветов

Данное обстоятельство требует дополнительно определять возможность считывания информации с HUD, систем дополненной реальности. Помимо расчёта коэффициента контрастности, который количественно определяет видимость изображения, необходимо также учитывать и цветовой контраст, а именно количественно определить цветовые отличия между цветом фона и суммарным цветом изображения и фона (ΔE). Для определения цветовых отличий воспользуемся формулой CIEDE2000 [2], в которую входят координаты цветности фона (L^*_1, a^*_1, b^*_1) и результирующего цвета (L^*_2, a^*_2, b^*_2) в цветовом пространстве $L^*a^*b^*$. Опираясь на законы колориметрии, в частности, на три закона Грассмана [3]:

– цвета ведут себя в смесях независимо от их спектрального состава. Следовательно, можно оперировать не излучениями, а цветами;

– цвета можно складывать. Если смешать два цвета, то результирующий цвет будет характеризоваться суммами пар оптических мощностей смешиваемых цветов;

– цвет представляет собой аффинный трехмерный вектор, и все цвета преобразуются по законам векторной алгебры, а также учитывая, что координаты цветности многокомпонентного света являются линейными комбинациями координат цветности каждого источника со своими весовыми коэффициентами [4], можно рассчитать координаты цветности фона (L^*_1, a^*_1, b^*_1) и результирующего цвета (L^*_2, a^*_2, b^*_2).

Далее, установим зависимости ΔE от яркости изображения красного, зелёного и синего цветов для трёх различных фонов (естественный белый, голубого неба, песков пустыни).

2. Анализ цветового контраста

Для анализа цветового контраста между фоном и результирующим цветом применим формулу расчета для малых цветовых отличий [2]. При этом считается, что малые цветовые различия находятся в диапазоне от 1 до 10 единиц цветового контраста. Различия более 10 единиц говорят о значительном цветовом контрасте. Если число ΔE меньше 2,3 для двух непересекающихся цветов, то обычный человек с трудом воспринимает это различие. В коммерческом производстве обычно считается допустимым число ΔE от 3 до 6.

В качестве естественного белого фона (фон «D65») использовали спектр излучения стандартного осветителя D₆₅. Спектры излучения фона «голубое небо» и «пески пустыни» были смоделированы на основе спектра D₆₅ и цветных фильтров, учитывающих рассеяние в атмосфере [5] и коэффициенты отражения от песчаной поверхности [6]. Спектры излучения светодиодов получены из коммерчески доступных [7]. Все расчёты производились с использованием стандартных методик и формул [3].

Координаты цветности фонов в цветовых пространствах $xY, L^*a^*b^*$ для максимальных значений яркостей представлены в таблице 1. Требуемые яркости изображения для трёх цветов определены исходя из порогового условия коэффициента контрастности.

Таблица 1. Координаты цвета фона, изображения и значения цветового контраста

Цвет фона и излучения	x	y	L*	a*	b*	Яркость макс., кд/м ²	ΔE макс., ед.		
							Red	Green	Blue
Фон «D ₆₅ »	0,313	0,329	90,78	0	0,02	23800	26	22	37
Фон «голубое небо»	0,225	0,240	73,55	-1,54	-41,6	14000	42	23	28
Фон «пески пустыни»	0,336	0,353	82,91	0,49	11,58	19040	28	22	49
Red	0,699	0,301	54,03	104,7	93,15	6800	—	—	—
Green	0,185	0,725	54,03	-107,12	62,19	6800	—	—	—
Blue	0,154	0,029	22,3	127,86	-129,28	6800	—	—	—

Согласно требованиям, предъявляемым к параметрам HUD, системам дополненной реальности, изложенным в «Квалификационные требования КТ-8055» [8], исследуемые системы должны обеспечивать видимость изображения при всех возможных внешних условиях полета, как при солнечной засветке 34000 кд/м^2 , так и при заходе ночью на слабоосвещенную взлётно-посадочную полосу. При этом, коэффициент контрастности изображения должен быть $\geq 1,20$ при яркости внешнего освещения 34000 кд/м^2 . Яркость изображения зелёного цвета примем равной $34000 \cdot 0,2 = 6800 \text{ кд/м}^2$. Считая, что комбинер имеет коэффициент пропускания $0,7$, максимальную яркость фона «D65» примем равной $34000 \cdot 0,7 = 23800 \text{ кд/м}^2$ со значением светлости $L^* = 90,78$. Максимальная яркость фона «голубое небо» с учетом коэффициента пропускания комбинера составит $20000 \cdot 0,7 = 14000 \text{ кд/м}^2$, а для фона «пески пустыни» – $34000 \cdot 0,8 \cdot 0,7 = 19040$.

Построим зависимости цветового отличия ΔE от яркости изображений красного (Red), зелёного (Green) и синего (Blue) цветов на фоне «D65», «голубое небо» и «пески пустыни».

Как можно видеть из Рис. 2, с увеличением яркости изображения, величина, характеризующая цветовое отличие ΔE (цветовой контраст), увеличивается. На фоне, моделирующем дневной белый (фон «D65»), излучение синего цвета наиболее отлично от него. На фоне, который моделирует фон голубого неба (фон «голубое небо»), цветовой контраст для изображения зеленого цвета минимален для яркостей менее 2000 кд/м^2 , с увеличением яркости, цветовой контраст для красного цвета становится больше, чем для синего. Цветовое отличие для яркости изображения 6800 кд/м^2 на фоне «D65», соответствующей условию порогового коэффициента контрастности, составило 22, 26, 37 единиц для зелёного, красного и синего, соответственно, и на фоне «голубое небо» – 23, 42, 28 единицы. Характер зависимости ΔE от яркости изображения для фона, моделирующего пески пустыни, практически совпадает с фоном «D65», поэтому на рисунке не приводится.

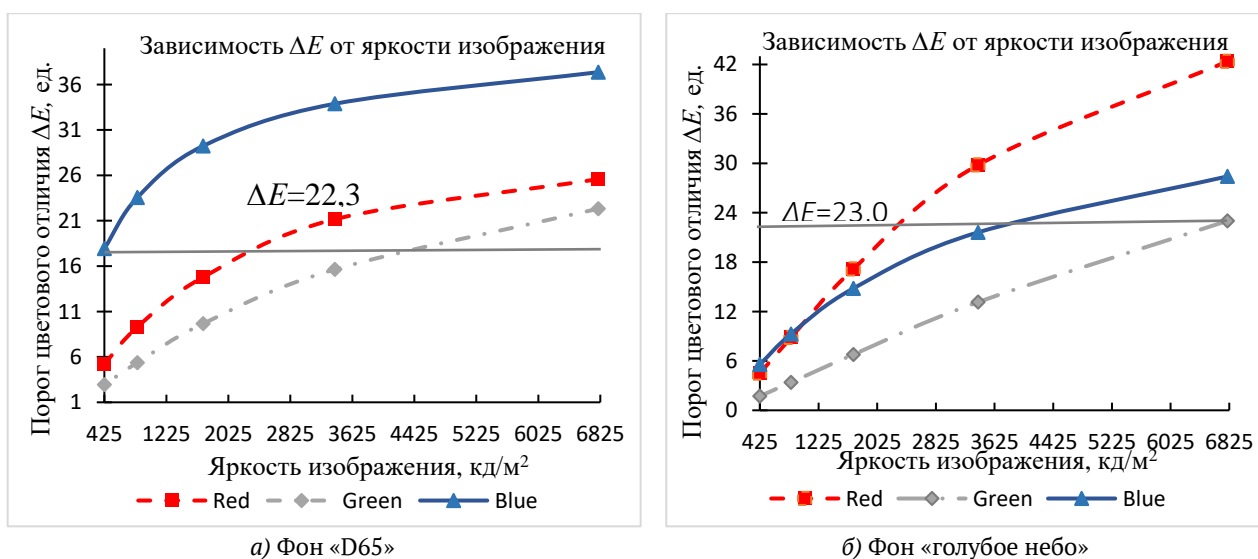


Рис. 2. Зависимости ΔE от яркости изображения

В целом, цветовой контраст для излучения красного и синего цветов выше, чем для зелёного, следовательно, для достижения требуемой величины цветового контраста необходима наибольшая яркость изображения зелёного цвета.

Заключение

В статье сформулирована задача, возникающая в HUD, системах дополненной реальности, связанная с изменением воспринимаемого цвета пилотом из-за смешения цвета изображения и фона. Предложенная методика, основанная на законах сложения цветов и пороге восприятия цветового контраста, позволила установить закономерности изменения величины цветового контраста от яркости и цвета изображения и фона.

Список источников

- [1] **Spitzer, C.** Digital Avionics Handbook / C. Spitzer, U. Ferrell, T. Ferrell. – CRC Press, 2017. – P. 302-328.
- [2] **Sharma, G.** The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations / G. Sharma, W. Wu, E.N. Dalal // Color Research & Application. – 2005. – Vol. 30, – № 1. – P. 21-30.
- [3] Горбунова Е. В., Чертов А. Колориметрия источников излучения: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. – 126 с.
- [4] **Шуберт, Ф.** Светодиоды/ Пер.с англ. под ред. А.Э. Юновича. 2е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
- [5] Diffuse sky radiation / URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Diffuse_sky_radiation
- [6] **Алтынов, А. Е.** Спектрометрирование ландшафта. Учеб. пособ. для студентов / А. Е. Алтынов, В. А. Малинников, С. М. Попов, А. Ф. Стеценко – М.: Изд. МИИГАиК. УПП «Репрография», 2010. – 120 с.
- [7] Spectral Power Distribution of LED / URL: <http://color.support/ledspd.html>
- [8] Требования к индикаторам на лобовом стекле. Квалификационные требования КТ-8055. Межгосударственный Авиационный Комитет. 34 с. / URL: https://www.studmed.ru/kt-8055-kvalifikacionnye-trebovaniya-trebovaniya-k-indikatoram-na-lobovom-stekle_d9beba35b53.html

Color contrast analysis in HUD, augmented reality systems

A. M. Berezovik¹, A. A. Stepanov²

¹ Display Glass LLC, Minsk, Belarus

² Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

This article is devoted to the method of calculating the brightness of the LED backlight module for liquid crystal imagers on the HUD, augmented reality systems, which provides the required image quality, taking into account the color difference threshold. The technique is based on determining the dependence of color differences due to the background (natural daylight, blue sky, desert sands) and the color of the image formed by LED backlighting, on the brightness of the background and red, green and blue LEDs. The calculated brightness values of the LED backlight for HUDs, augmented reality systems can be used in the design of augmented reality information display systems.

Keywords: HUD, Augmented reality systems, Color perception, Color contrast.

Особенности и перспективы использования AR-устройств для задач гражданской авиации

Е. Ю. Зыбин, М. А. Леликов, Ю. С. Калюжный

Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», Москва, Российская Федерация

Данная статья посвящена истории развития систем дополненной реальности от момента зарождения данной технологии до настоящего времени. Приведены примеры существующих на рынке в настоящий момент образцов. Обозначены их недостатки. В статье отдельно указывается на отсутствие нормативной базы для применения данных решений в гражданской авиации. Также приведены направления развития технологий, которые позволят устранить существующие недостатки и активнее использовать системы дополненной реальности для повышения ситуационной осведомленности пилотов в обеспечении безопасности полетов в гражданской авиации.

Ключевые слова: AR, Системы дополненной реальности, Эргономика гарнитур дополненной реальности, Безопасность полетов.

Цитирование: **Зыбин, Е. Ю.** Особенности и перспективы использования AR-устройств для задач гражданской авиации / Е. Ю. Зыбин, М. А. Леликов, Ю. С. Калюжный // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 166–170.

Введение

Устройства augmented reality (AR) в авиации применяются в составе систем дополненной реальности (СДР), как часть комплексов бортового оборудования воздушного судна и предназначены для отображения пилотажно-навигационной информации, информации от систем синтезированного и улучшенного видения, карт движения по аэродрому, трафика воздушных судов, плана полёта и т.д. Такие устройства имеют ряд преимуществ перед традиционными индикаторами на лобовом стекле, а также многофункциональными индикаторами, такие как многоцветность в части индикаторов на лобовом стекле, «абсолютный» обзор в части многофункциональных индикаторов, позволяющий видеть даже сквозь обшивку самолёта, дешёвизна оборудования и его установки и др.

Главная цель данной системы - повышение эффективности пространственной ориентации пилотов, достигается тем, что система отображения информации для управления воздушным судном позволяет пилоту видеть в стереорежиме сформированное компьютером и позиционированное в реальном пространстве изображение ориентированных вдоль линии горизонта виртуальных трехмерных объемных объектов, которые являются маркерами визуального представления расчетной траектории, прогноза положения и реальной траектории воздушного судна, графические свойства которых, в частности форма, цвет, эффекты анимации, отображают отклонения параметров полета от расчетных и являются подсказками пилоту для удержания воздушного судна на расчетной траектории с заданными характеристиками. Стереоскопическое воспроизведение

трехмерных объемных маркеров позволяет пилоту с большой точностью визуально оценивать угловые координаты положения воздушного судна.

Анализ существующих решений

В 1950-х годах вооруженные силы стали первыми, кто начал применять технологию дополненной реальности (AR) и виртуальной реальности (VR). В то время эти технологии были опередившими свое время и свои рынки. Однако отсутствие коммерчески доступных компонентов для систем виртуальной реальности, таких как, инерциальных измерительных блоков (IMU), компактных графических процессоров для 3D-рендеринга и технологий беспроводной передачи данных ограничило первый всплеск виртуальной реальности. Другой причиной было отсутствие цифрового контента, а точнее, отсутствие четкого видения адаптированного контента VR/AR для корпоративных или коммерческих применений.

С середины 2014 года начался интенсивный рост количество стартапов в области AR/VR/MR, включая такие компании, как Magic Leap, и появление новых продуктов MR, таких как гарнитуры HoloLens VI и Meta2 MR, HTC Vive, Oculus VR-гарнитуры DK2 и CV1, корпоративная версия Google Glass V2 и умные очки Intel Vaunt. После этого часть компаний закрылись или были поглощены более крупными игроками, но вместе с этим появились новые продукты, разработанные специально для корпоративного сектора, такие как HoloLens V2, Google Glass V3 и т.д. Это здоровое развитие, которое создает основу для потенциально сильного рынка XR, опирающегося на отрасли, способные не только разрабатывать необходимое оборудование, но также создавать платформы разработки и экосистемы программного обеспечения/облачных вычислений, чтобы поддерживать устойчивые усилия MR в отрасли и обеспечивать рентабельность инвестиций в такие производства.

Помимо рынков потребительских и корпоративных продуктов, существует значительный рынок оборонной продукции для гарнитур MR. В четвертом квартале 2018 года Microsoft заключила контракт с армией США на разработку и поставку специальных версий HoloLens под названием IVAS (Integrated Visual Augmentation System). Это самый крупный контракт в истории AR/VR/MR, и он будет способствовать развитию всей экосистемы MR во всем мире.

В настоящее время продолжается активное развитие существующих систем дополненной реальности, которое обозначено двумя основными направлениями: развитие аппаратной части и развитие концепции применения. Тренды задают следующие решения (см. рис. 1):

- SKYLENS производства израильской фирмы Elbit Systems;
- TopMax производства французского консорциума Thales;
- SimEye SX50T разработанные фирмой Rockwell Collins;
- решение компаний AERO GLASS совместно с AIRBUS (применили очков дополненной реальности Epson Moverio BT-40).



Рис. 1. Примеры систем дополненной реальности

Все эти образцы разрабатывались до появления каких либо-отраслевых стандартов, так как на сегодняшний день нормативных документов, регламентирующих параметры очков дополненной реальности для применения на ВС ГА не существует. Исходя из того, что системы дополненной реальности в части оптических параметров предполагается использовать абсолютно в тех же условиях, что и индикаторы на лобовом стекле самолетов, следует придерживаться требований наиболее подходящего документа, а именно Квалификационных требований МАК КТ-8055 «Индикаторы на лобовом стекле».

При выборе систем с голографическим принципом отображения, развитие которых, как видно из приведенных выше примеров получило наибольшее распространение [1] должен обеспечиваться коэффициент контрастности изображения не менее 1.2 при яркости фона внешнего освещения 34.000 Кд/м². Из этого простым расчетом следует, что яркость наблюдаемого изображения не менее должна быть не менее 7.000 Кд/м².

Как видно, ни один из описанных выше типов выпускаемых очков дополненной реальности даже близко не соответствует этому параметру, разница составляет порядок и более. Для обеспечения визуального контраста при яркой закабинной обстановке производители предлагают одевать дополнительные контрастирующие фильтры со светопропускание 50% и менее. Таким образом, грубо нарушается еще одно требование КТ-8055, а именно прозрачность всей оптической системы должна быть не менее 70%.

Так как качество отображаемой информации зависит от точности позиционирования очков системы в кабине, отдельным вопросом следует рассматривать компоненты, системы позиционирование очков системы дополненной реальности в кабине воздушного судна. Для решения этой задачи существует несколько подходов. Определение положения очков дополненной реальности по видеокамере, направленной на лицо пилота, видеокамере, направленной на специализированные метки [2] или компоненты кабины [3, 4], которые

распознаются программным обеспечением, а также инерциальной системой установленной непосредственно на очках. Так как каждое из этих решений по отдельности имеет свои недостатки, перспективные разрабатываемые образцы имеют тенденцию к комбинированию из нескольких решений [5].

В связи с тем, что в процессе выполнения полета пилоты активно взаимодействуют между собой, с остальными членами летного экипажа, а также с диспетчерами, для этого они практически постоянно должны носить гарнитуру, возникает дополнительное требование, а именно интегрировать очки системы дополненной реальности с авиационной гарнитурой.

Заключение

В статье приведены задачи, которые должны решать системы дополненной реальности. Выполнен анализ существующих технических решений для систем дополненной реальности, также приведены недостатки существующих систем.

Таким образом на сегодняшний день актуальной задачей является развитие обозначенных в статье направлений для развития систем дополненной реальности:

- нормативной базы, регламентирующих характеристики систем;
- микродисплеи и оптические контуры;
- компоненты позиционирования очков внутри ВС;
- уменьшения массово-габаритных, а также энергопотребления очков для облегчения конструкции.

Список источников

- [1] **Ruffner J., Labbe L., Fulbrook J.** An Augmented Reality Binocular System (ARBS) for Air Traffic Controller. In Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering. Bellingham, WA, USA, 2008.
- [2] **Valerius B.** An Overview of Autostereoscopy as Used in Augmented and Virtual Reality Systems. URL: <https://wiki.umn.edu/pub/UmmCSciSeniorSeminar/Spring2011Talks/BrianValerius.pdf>, 2011.
- [3] **Alvarez H., Aquinaga I., Borro D.** Providing Guidance for Maintenance Operations Using Automatic Markerless Augmented Reality System. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Basel, Switzerland, 2011.
- [4] **Caponio A., Hincapie M., Mendivil E.** IMAR: highly parallel architecture for markerless augmented reality in aircraft maintenance. In Proceedings of the 2011 international conference on Virtual and mixed.
- [5] **Engelbrecht H., van Wyk C.** Markerless Augmented Reality on Mobile Devices with Integrated Sensors. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Basel, Switzerland, 2011.

Features and prospects of using AR devices for civil aviation tasks

E. Y. Zybin, M. A. Lelikov, Y. S. Kalyuzhny

State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russian Federation

This article is devoted to the history of the development of augmented reality systems from the inception of this technology to the present. Examples of samples currently on the market are given. Their shortcomings are indicated. The article separately points out the lack of a regulatory framework for the application of these decisions in civil aviation. Also, directions for the development of technologies are given that will eliminate existing shortcomings and more actively use augmented reality systems to increase situational awareness of pilots to ensure flight safety in civil aviation.

Keywords: AR, Augmented reality systems, Ergonomics of augmented reality headsets, Flight safety.

Способы оценки психофизиологического состояния пилота воздушного судна

Г. А. Платошин, И. Б. Мищенко, В. В. Косьянчук, Е. Ю. Зыбин

Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», Москва, Россия

Оценка психофизиологического состояния пилота одно из основных направлений современных исследований по операционным виртуальным помощникам. На данном этапе разрабатывается система психофизиологической оценки состояния пилота, необходимая для определения текущего состояния и принятия решения о возможности пилота продолжать управление воздушным судном. Для проведения процедуры мониторинга психофизиологических параметров, в частности сердечного ритма, разрабатывается биометрический браслет пилота, включающий в себя оптические датчики фотоплетизмографии. А также разрабатывается система определения состояния пилота по камере (глазодвигательные реакции, VR очки) на борту воздушного судна.

Ключевые слова: Фотоплетизмография, Психофизиологическое состояние, Авиация, Камера, Операционный виртуальный помощник.

Цитирование: Платошин, Г. А. Способы оценки психофизиологического состояния пилота воздушного судна / Г. А. Платошин, И. Б. Мищенко, В. В. Косьянчук, Е. Ю. Зыбин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 171–174.

Введение

В рамках развития авиационной промышленности разрабатывается концепция технического облика виртуального пилота, прогнозирующая переход к одночленному экипажу. Концепция управления воздушным судном посредством одночленного экипажа предполагает автоматизацию процессов, позволяющих снизить нагрузку на пилота и обеспечить требуемый уровень безопасности транспортной системы. Ввиду этого в период осуществления профессиональной деятельности и в момент высокой рабочей нагрузки важно производить мониторинг и оценивать динамику изменения функционального состояния пилота в режиме реального времени, поскольку это позволяет спрогнозировать момент потери дееспособности, и принять соответствующие меры (переход в автономный режим, передача управления другому оператору и пр.). В данной работе представлено описание способов оценки психофизиологического состояния пилота воздушного судна, в том числе с возможностью выявления индикаторов сонливости, повышенной нагрузки, рассеянности (мануальной, зрительной, слуховой и когнитивной), эмоционального состояния и др.

1. Биометрический браслет пилота

Система мониторинга психофизиологического состояния пилота может контролировать как физиологические, так и поведенческие параметры. В качестве средства контроля физиологических параметров разрабатывается биометрический браслет пилота,

включающий в себя оптические датчики фотоплетизмографии для мониторинга сердечного ритма, высокоточные трехосевые гироскоп и акселерометр для мониторинга эргономики движений пилота во время рабочего процесса, в том числе отслеживание реакций в момент критических ситуаций (стресс, снижение концентрации внимания, потеря сознания) [1]. Также биометрический браслет пилота содержит такие функциональные возможности, как индикация и вывод полезной информации на дисплее для информирования пользователя, в том числе тактильная обратная связь посредством вибромотора и звукового оповещения при помощи встроенного динамика. Информационный обмен биометрического браслета пилота и бортовой системы осуществляется через Bluetooth и USB Type-C, выбор которых обусловлен конструктивной реализацией и унификацией.

2. Система регистрации движения глаз пилота

Взгляд является основным индикатором, используемым для обнаружения визуального отвлечения внимания, сонливости и других признаков поведенческой реакции пилота. В клинических условиях динамику взгляда отслеживают с помощью электроокулографии (ЭОГ) [2], которая подразумевает использование электродов. Поскольку данный метод затруднительно применять в рабочих условиях на воздушном судне, в качестве альтернативы, можно использовать неинвазивную окулографическую систему (айтрекер) на основе видеоподхода. Отслеживание движения и положения глаз происходит следующим образом: айтрекер освещает один или оба глаза безопасным инфракрасным (ИК) излучением, которое отражается и улавливается монохромной камерой, также чувствительной в ИК-диапазоне [3]. В зависимости от расположения источника инфракрасной подсветки относительно основной камеры, на кадрах достигается разный контраст между зрачком и радужной оболочкой. Выделяют метод яркого и темного зрачка. Параллельное расположение ИК излучателя и оптической оси камеры приводит к созданию эффекта яркого зрачка ввиду того, что глаз работает вторичным отражателем света. Если же источник подсветки сдвинут относительно оптической оси камеры, зрачок становится чёрным, поскольку вторичное отражение от сетчатки не поступает в камеру. Таким образом, происходит получение последовательных кадров изображений глаз, по которым, путем применения к ним методов анализа изображений, устройство определяет ориентацию взгляда и динамику зрачков.

Из каждого видеокadra извлекается большое количество параметров глаза, связанных с движениями век (включая моргание) и глазного яблока (включая саккады). Фиксация поведенческой реакции может осуществляться с помощью применения сверточной нейронной сети и метода опорных векторов для задач классификации с целью определения таких показателей, как динамика закрытия глаз (продолжительность, частота и интервал), а также скорость закрытия и повторного открытия глаз, процент закрытия века над зрачком за время (PERCLOS) и др. [4, 5, 6]. В общем виде, бортовой вычислитель в реальном времени применяет алгоритм для определения области лица пилота, далее устанавливаются ключевые точки органов на лице, и затем определяется радужная оболочка и зрачок посредством выделения краев на поле глаза, и далее уже используют кусочный угловой детектор глаза для

обнаружения угла глаза [7]. Также стоит отметить, что необходимо компенсировать движения головы с помощью синусоидальной модели для минимизации погрешностей при анализе и построении карты взгляда.

Заключение

В представленной работе основное внимание уделяется способам оценки психофизиологического состояния пилота воздушного судна, а именно приводится описание системы мониторинга включающей биометрический браслет пилота и систему регистрации движения глаз. Наилучшие результаты для обнаружения и прогнозирования нештатных ситуаций достигаются при создании взаимосвязанных систем исследования поведенческих и физиологических данных. В реальных условиях сложно получить диаметр зрачка и оценить такие показатели как вариабельности сердечного ритма, в том числе из-за проблем с условиями освещения, разрешением камеры, артефактами движений при взаимодействии датчиков с исследуемой областью и тд. Поэтому разработка системы оценки психофизиологического состояния пилота и различных методов математического анализа данных является актуальной и значимой задачей для авиационной отрасли, способствующая развитию технических средств контроля в рамках задач интеллектуальной поддержки пилота и обеспечения безопасности полетов воздушных судов.

Список источников

- [1] **Kalakutsky, L. I.** Equipment and methods of clinical monitoring / L. I. Kalakutsky, E. S. Manelis // Tutorial. Samara: Samar. state aerospace un-t. — 1999. — P. 161.
- [2] **Brown, M.** ISCEV Standard for Clinical Electro-oculography (EOG) / M. Brown, M. Marmor, Vaegan, E. Zrenner, M. Brigell, M. Bach // Doc. Ophthalmol. — 2006, — Vol. 113, — P. 205–212.
- [3] **Wojciechowski, A.** Single web camera robust interactive eye-gaze tracking method / A. Wojciechowski, K. Fornalzyk // Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences. . — 2015. — Vol. 63, — № 4. — DOI: 10.1515/bpasts-2015-0100.
- [4] **Massoz, Q.** Multi-timescale drowsiness characterization based on a video of a driver's face / Q. Massoz, J. Verly, M. Van Droogenbroeck //Sensors. — 2018, — № 18, — P. 2801.
- [5] **Teyeb, I.** Vigilance measurement system through analysis of visual and emotional driver's signs using wavelet networks / I. Teyeb, O. Jemai, M. Zaied, C. Amar // In Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA). Marrakech, Morocco. 14–16 December 2015. — P. 140–147.
- [6] **Bergasa, L.** Real-time system for monitoring driver vigilance / L. Bergasa, J. Nuevo, M. Sotelo, R. Barea, M. Lopez // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. — 2006. — № 7, — P. 63–77.
- [7] **Guestrin, E. D.** General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections / E. D. Guestrin, E. Eizenman // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 2006. — Vol. 53, Is. 6. — P. 1124–1133.

Methods for assessing the psychophysiological state of an aircraft pilot

G. A. Platoshin, I. B. Mishchenko, V. V. Kosyanchuk, E. Y. Zybin

Federal Autonomous Institution "State Research Institute of Aviation Systems", Moscow, Russia

The assessment of the psychophysiological state of the pilot is one of the main directions of modern research on operational virtual assistants. At this stage, a system of psychophysiological assessment of the pilot's state is being developed, which is necessary to determine the current state and make a decision on the pilot's ability to continue flying the aircraft. To carry out the procedure for monitoring psychophysiological parameters, in particular heart rate, a biometric pilot bracelet is being developed, which includes optical sensors for photoplethysmography. And also a system is being developed to determine the pilot's condition by the camera (oculomotor reactions, VR glasses) on board the aircraft.

Keywords: Photoplethysmography, Psychophysiological state, Aviation, Camera, Operational virtual assistant.

Индикатор на лобовом стекле с брэгговскими решетками вывода на фото-термо-рефрактивном стекле

С. А. Иванов, Е. С. Мусихина, Н. В. Никоноров, Д. Соболев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлен вариант системы индикатора на лобовом стекле на основе световодной пластины и брэгговских решеток вывода. Ввод изображения в световод осуществляется за счет призмы, что позволяет обеспечить высокую яркость картинки. Вывод изображения реализуется за счет голограмм на фото-термо-рефрактивном стекле. Особенностью данной системы является то, что зона вывода существенно превышает размеры одиночной голограммы и набирается за счет плиточного мощения всей зоны отдельными элементами. В работе рассмотрены проблемы такого подхода при совмещении отдельных плиток для вывода общей картинки.

Ключевые слова: ИЛС, Дифракционные оптические элементы, Фото-термо-рефрактивное стекло, Брэгговские решетки.

Цитирование: **Иванов, С. А.** Индикатор на лобовом стекле с брэгговскими решетками вывода на фото-термо-рефрактивном стекле / С. А. Иванов, Е. С. Мусихина, Н. В. Никоноров, Д. Соболев // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 175–178.

Введение

На сегодняшний день технологии дополненной реальности активно развиваются и уже несколько компаний имеют рабочую платформу на основе волноводных комбинеров с дифракционными элементами для ввода и вывода изображения. Использование таких элементов и волновода в целом позволяют существенно сократить вес такого устройства и габаритные размеры проекционной системы. Недавно, также был продемонстрирован прототип системы дополненной реальности носимого устройства на объемных брэгговских решетках на фото-термо-рефрактивном (ФТР) стекле [1,2]. Помимо очевидного преимущества стекла в том, что оно одновременно выполняет функции материала для записи дифракционных элементов и для волноводного распространения излучения, было показано, что системы ввода/вывода на основе объёмных брэгговских элементов за счет высокой спектрально-угловой селективности позволяют избежать таких проблем как посторонние блики в системе. А также было показано, что выходное поле, передаваемое одной решеткой существенно больше, чем ее контур селективности. Однако в случае систем индикации на лобовом стекле (ИЛС) встала другая проблема, а именно, размер таких индикаторов обычно составляет 200–300 мм, в то время как элементы из ФТР стекла на данный момент могут быть изготовлены лишь с размерами до 50 мм. В работе рассматривается вариант решения такой проблемы за счет мощения рабочей площади ИЛСа элементами из ФТР стекла меньшего размера.

1. Используемые методы и подходы

Для проведения эксперимента на базе научно-исследовательского центра оптического материаловедения университета ИТМО было синтезировано фото-термо-рефрактивное стекло [2]. Синтез стекла производился в высокотемпературной лабораторной печи Carbolite GERO при температуре 1440°C в платиновом тигле. Перемешивание расплава осуществлялось платиновой мешалкой. Отжиг стекла производился в муфельной печи в течение 10 ч при температуре 485°C.

Для записи элементов были изготовлены пластины 20x15x2мм. Поверхность образцов была предварительно отшлифована и отполирована.

Запись решеток в ФТР стекле осуществлялась путем облучения стекла излучением гелий-кадмиевого лазера Kimmon K Series IK3501R-G с длиной волны излучения 325 нм.

Проявление голограмм осуществлялось с помощью термообработки в муфельной печи Nabertherm N11/2 при температуре $\approx 500^\circ\text{C}$ в течение 6 часов. Нагрев печи производился со скоростью 5°C в минуту.

2. Результаты

Как и в предыдущей работе элементы вывода были основаны на пропускающих брэгговских решетках, так как такие решетки проще всего записать ультрафиолетовым излучением из воздуха. Решетки были рассчитаны на работу в зеленом цвете с центральной длиной волны 540 нм. Параметры всех решеток в системе были одинаковы. Макет ИЛСа с мощной зоной вывода представлен на рис.1. В качестве элемента ввода излучения в волновод была использована призма. Такой подход позволяет радикально повысить эффективность ввода. Призма и ФТР стекло были приклеены на оптический клей на поверхность волновода. Разница в толщине волновода в области без ФТР элементов была компенсирована дополнительной кварцевой пластиной. В случае отсутствия такой пластины в выводимом изображении появлялась существенная темная полоса, так как положительный перепад высот приводит к тому, что в зоне вывода появляются области без лучей.



Рис. 1. Фотография макетного образца ИЛС с 4 сегментами из ФТР стекла в зоне вывода

На первой итерации была собрана система из 4 решеток сразу после термической обработки. Анализ изображения на выходе системы показал, что несмотря на то, что все

решётки имели одинаковые параметры, само стекло в процессе термообработки деформируется. Эти деформации достаточны для того, чтобы повлиять на положение выводимого изображения на бесконечности. Таким образом, собрать полноценное изображение из 4 сегментов не удалось. Основной проблемой было горизонтальное и вертикальное смещение (рис. 2б) выводимых изображений отдельными элементами. Более того, было показано, что деформации также искажают ход лучей, что приводит к искажению изображения (рис. 2а). В связи с этим после термообработки сегментов ИЛС была проведена дополнительная полировка элементов с клиновидностью, не превышающей 10 угловых секунд. После дополнительной полировки проблема вертикального смещения изображения ушла полностью, однако, горизонтальное смещение все еще присутствовало в системе и было обусловлено переменной толщиной клеевого слоя под каждым отдельным элементом. Для исключения второй проблемы был собран специальный стенд, с помощью которого при размещении образцов на волноводе перед склейкой можно было отрегулировать положение каждой пластины так, чтобы изображение на бесконечности не двоилось. В результате отдельные сегменты удалось выставить с достаточной точностью чтобы изображение на бесконечности не раздваивалось (рис.2в). Дополнительные эксперименты показали, что изменение геометрии сегментов, приводит к радикальному ухудшению качества выводимого изображения, а именно к вертикальному расхождению картинок от разных сегментов.



Рис. 2. Фотография изображения, выводимого системой в различных частях ИЛСа

3. Заключение

В результате работы был создан макет ИЛС с мощеной зоной вывода. Зона вывода была собрана из четырех сегментов. Каждый сегмент представлял собой записанную на ФТР стекле объемную брэгговскую решетку вывода. Изображение заводилось в волновод за счет призмы. Было показано, что такая система отлично работает при несимметричном вводе. Изменение геометрии образцов после записи радикально влияет на качество выводимого изображения. Также установлено, что полировка образцов после термообработки обязательна.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Odinokov S. B.** Augmented reality display based on photo-thermo-refractive glass planar waveguide // *Odinokov, S. B., Shishova, M. V., Markin, V. V., Lushnikov, D. S., Zherdev, A. Y., Solomashenko, A. B., ... & Ivanov, S. A.* // *Optics Express*. – 2020. – Т. 28. – №. 12. – С. 17581-17594.
- [2] **Иванов, С. А.** Световодный оптический комбинер на фото-термо-рефрактивном стекле с брэгговскими решетками для нашиваемых дисплеев / С. А. Иванов, Е. С. Мусихина, Н. В. Никоноров // *HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов*. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 165–167.

Lightguiding head up display with tiled up Bragg out-coupler on photo-thermo-refractive glass

S. Ivanov, E. Musikhina, Nikolay Nikonorov, D. Sobolev

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

In present paper head up display system based on combination of light-guiding slab and Bragg out-coupler is presented. Image in-coupling into light guiding slab is provided by prism, which in turn results in high brightness of an image. Image out-coupler is realised on Bragg gratings recorded in photo-thermo-refractive glass. In our concept out-coupling zone on the light-guiding slab is much bigger than single hologram, therefore this zone is tiled up with several elements. In the paper we consider some problems of such approach. Namely, the aligning of each hologram in order to maintain undisturbed image output.

Keywords: HUD, Bragg gratings, Photo-thermo-refractive glass.

Особенности разработки составных оптических волноводов для устройств дополненной реальности

А. Б. Соломашенко, О. Л. Афанасьева, А. С. Кузнецов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Составной оптический волновод является одним из наиболее перспективных элементов для применения в составе устройств дополненной реальности, т.к., с одной стороны, объединяет в себе все преимущества волноводов дифракционного типа (минимальная толщина, высокий размер рабочего углового поля зрения и выходного зрачка и др.), но, с другой, обладает гораздо большей эффективностью. Тем не менее существует ряд вопросов, связанных с разработкой технологии изготовления волноводов данного типа как для одномерного, так и для двумерного исполнения, а также реализации оптической схемы проекционного модуля на их основе, которые рассмотрены в данном докладе.

Ключевые слова: Волновод, Дополненная реальность, Технологический процесс, Коэффициент отражения, Яркость.

Цитирование: Соломашенко, А. Б. Особенности разработки составных оптических волноводов для устройств дополненной реальности / А. Б. Соломашенко, О. Л. Афанасьева, А. С. Кузнецов // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 179–182.

Составной оптический волновод представляет собой плоскопараллельную стеклянную пластину, состоящую из склеенных под определённым углом ромбических призм с нанесёнными на их поверхность частично отражающими покрытиями [1, 2], как показано на рис. 1. Излучение в волновод вводится через вспомогательную призму и распространяется внутри волновода под углом полного внутреннего отражения пока не попадает на отражающие грани, которые позволяют вывести излучение в сторону наблюдателя. В данном случае происходит мультиплексирование зрачка по одной (горизонтальной) координате, а для расширения по двум координатам необходимо либо корректным образом смоделировать коллимирующую оптическую систему проектора, либо создать т.н. двумерный составной волновод, в котором будут реализованы отдельные 2 стопки наклонных ромбических призм, но технологический процесс изготовления такого оптического компонента является достаточно сложной задачей.

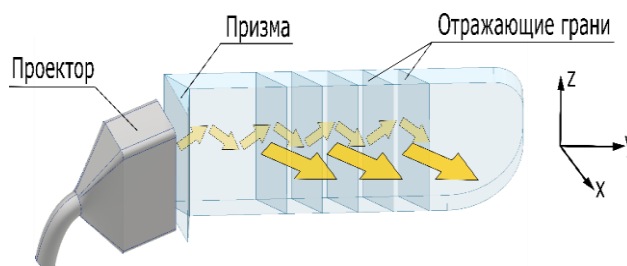


Рис. 1. Модуль отображения информации на основе призмного волновода

В общем случае рабочее угловое поле 2ω , которое может обеспечить волновод, ограничено углом скольжения γ , при котором излучение не будет отражаться от параллельных поверхностей, а будет скользить вдоль одной из них, и углом полного внутреннего отражения α . Варьируя значение показателя преломления в диапазоне от 1,5 до 1,7, можно добиться значений углового поля (по диагонали) от 32° до 44° .

Максимально возможный размер входного зрачка в общем случае связан с толщиной пластины d и углом распространения излучения внутри волновода α и равен:

$$D_{\max} = d / \cos \alpha. \quad (1)$$

Чем меньше толщина пластины, тем меньший размер входного зрачка коллимирующей оптической системы необходимо обеспечить, как показано на рис. 2а. Например, при $d = 2$ мм и показателе преломления в диапазоне от 1,5 до 1,7 значения эффективного размера входного зрачка составляет от 2,4 до 2,5 мм. С одной стороны, небольшой размер входного зрачка обуславливает минимальные размеры коллимирующей оптической системы для ввода излучения в волновод, но с другой, при мультиплексировании такого зрачка по горизонтальной координате (рис. 1) область вывода изображения из волновода будет иметь вид длинной, но узкой (высотой эквивалентной размеру зрачка) линии, что, как было отмечено выше, требует предварительного расширения зрачка по одной (вертикальной) координате.

На рис. 2б приведен график зависимости эффективного размера зрачка коллимирующей оптической системы проектора от толщины пластины для разных значений размера рабочего углового поля. В качестве материала выбрано стекло СТК7 с показателем преломления $n = 1,69$.

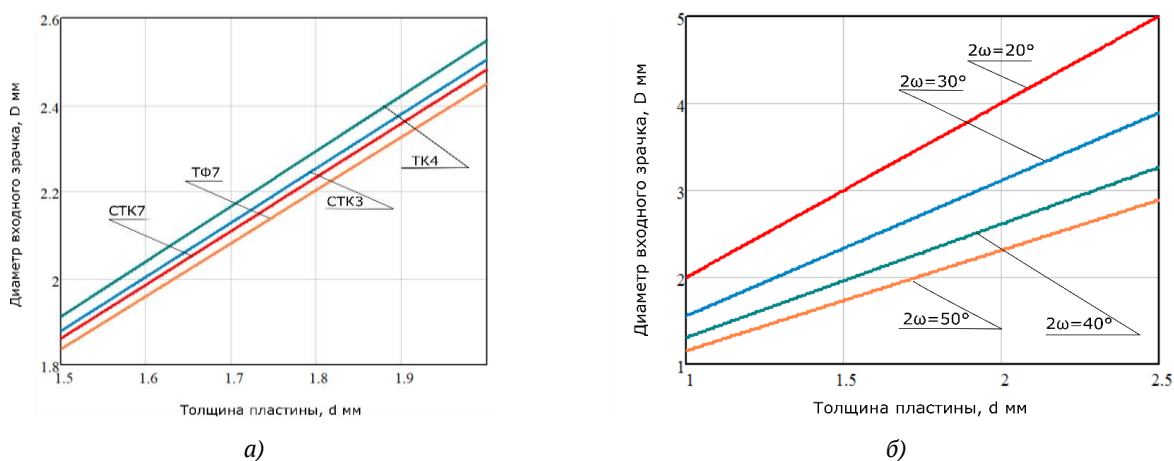


Рис. 2. Зависимость диаметра входного зрачка от толщины пластины: а) для разных материалов, б) для разных угловых полей

Другой особенностью данного волновода является тот факт, что, с одной стороны, он должен иметь высокое светопропускание «на просвет», а с другой, высокое отражение от граней ромбических призм для обеспечения максимальной эффективности. Коэффициент отражения на последней грани примем равным $\rho_6 = 0,4$ для получения коэффициента светопропускания 0,6. Для обеспечения равномерности яркости наблюдаемого изображения, необходимо, чтобы коэффициенты отражения от каждой грани были различными, а формула для определения их значений имеет вид:

$$\rho_i = \frac{\rho_{i+1}}{1 + \rho_{i+1}}. \quad (2)$$

Количество отражающих граней N определяется с учетом требований по размеру рабочего углового поля 2ω , выходного зрачка $D_{зр}^{вых}$, его удаления от пластины волновода L , а также наклона отражающих граней β , т.е. $N = (D_{зр}^{вых} + 2L \cdot \operatorname{tg} \omega) \cdot \operatorname{tg} \beta / d$. В данном случае количество отражающих граней равно 6, а их коэффициенты отражения равны соответственно 0,133; 0,154; 0,182; 0,222; 0,286 и 0,400.

Недостатком составного волновода является технологически сложный процесс изготовления поскольку он собран из различных элементов (пластин) склеенных между собой, важно соблюдать требования по клиновидности для того, чтобы исключить искажения при выводе изображения, как показано на рис. 3.



а) клиновидность пластин 5'



б) клиновидность пластин 8'



в) клиновидность пластин 14'

Рис. 3. Примеры выводимых изображений

Для минимизации размеров коллимирующей оптической системы целесообразно использовать светоделительные кубики или призмы [2, 3], но для устранения паразитных изображений и двоений приходится использовать поляризационные покрытия и четвертьволновые пластинки, что повышает поглощение внутри оптической системы. Например, при использовании монохромного SiOLED дисплея яркостью порядка 8000 кд/м², яркость наблюдаемого изображения составляет порядка 220-250 кд/м².

В результате получен образец со следующими параметрами: стекло пластины СТК7 с показателем преломления $n = 1,69$, толщина $d = 2$ мм, угловое поле $2\omega = 34,132^\circ$, размер входного зрачка $D = 2,406$ мм, удаление выходного зрачка 20 мм, количество отражающих граней – 6.

Благодарность

Исследование проведено в МГТУ им. Баумана в рамках реализации НИР по программе «Приоритет 2030».

Список источников

- [1] Патент № 2016 140 880 РФ. Компактная система дисплея, устанавливаемая на голове / АМИТАИ Яаков – Оpubл. 20.04.2018.
- [2] Патент № 2017 116 184 РФ. Компактная нашлемная система индикации, защищенная сверхтонкой структурой / Амиатаи Яаков, ОФИР Юваль, МОР Элад – Оpubл. 20.04.2018.

- [3] **Zhou, Y.** Design of a dual-focal geometrical waveguide near-eye see-through display / Zhou Y., Zhang J., Fang F. // Optics & Laser Technology. – 2022. – T. 156. – C. 108546. — DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108546.

Features of the development of optical lightguides for augmented reality devices

A. B. Solomashenko, O. L. Afanaseva, A. S. Kuznetsov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Optical lightguide is one of the most promising elements for use in augmented reality devices, because it combines all the advantages of diffraction-type waveguides (minimum thickness, high field of view and exit pupil, etc.), but it is much more efficient. Nevertheless, there are a number of issues related to the development of the technology for manufacturing this type of lightguides, as well as the implementation of the optical scheme of the projection module based on them.

Keywords: Lightguide, Augmented reality, Technological process, Reflection coefficient, Brightness.

Оценка влияния погрешностей оптического материала на качество изображения AR-устройства на основе волновода

О. Л. Афанасьева, А. Б. Соломашенко

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Важным фактором, влияющим на качество изображения, которое формирует устройство дополненной реальности на основе волновода, является характеристика оптического материала. Выбор требований к оптической однородности, бессвильности, пузырности, общим и местным ошибкам при разработке документации на волновод и изготовлении подложки должен быть обоснован. В данном докладе приводится описание различных математических моделей для оценки влияния погрешностей оптического материала на качество изображения.

Ключевые слова: Волновод, Дополненная реальность, Оптическое стекло, Пузырь, Включение, Качество изображения.

Цитирование: **Афанасьева, О. Л.** Оценка влияния погрешностей оптического материала на качество изображения AR-устройства на основе волновода / О. Л. Афанасьева, А. Б. Соломашенко // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 183–185.

В последнее время технология голографических волноводов набирает особую популярность в области систем отображения информации [1]. В некоторых работах был проведён анализ и расчёт основных параметров таких волноводов [2]. Однако влияние качества материала стекла подложки на сформированное волноводом изображение в настоящее время исследовано не в полной мере. Погрешности изготовления оптической поверхности приводят к искажению проходящего через неё волнового фронта, что в свою очередь, вызывает изменение структуры изображения и ухудшение его качества. В связи с тем, что излучение вводится в волновод и распространяется внутри него под углом полного внутреннего отражения (ПВО), ошибки будут накапливаться по мере распространения излучения в пластине [3].

В работе проведён анализ влияния отклонения формы поверхности, а также наличия местных дефектов на качество изображения, осуществлён выбор требований к оптической однородности, бессвильности, пузырности, общим и местным ошибкам подложки волновода. Для оценки влияния различных ошибок и погрешностей изготовления подложки в работе было проведено моделирование голографического волновода в системе автоматизированного проектирования Zemax (рисунок 1).

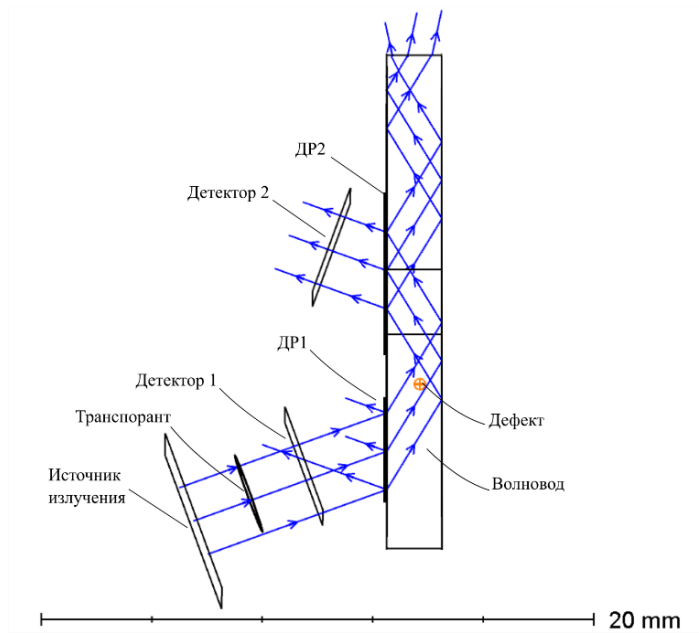


Рис. 1. Схема распространения излучения в волноводе

Система была задана в непоследовательном режиме. Излучение от источника проходит транспарант, после чего регистрируется детектором 1 (рисунок 2а) и попадает на входную область волновода, который, в свою очередь, представляет собой плоскопараллельную стеклянную пластинку с двумя голографическими дифракционными решётками: для ввода (ДР1) и вывода (ДР2) изображения, ориентированными перпендикулярно. Параметры волновода подобраны таким образом, чтобы при попадании на решётку, первый рабочий порядок излучения отклонялся под углом большим или равным углу ПВО. Далее излучение выводится через выводную ДР2, после чего регистрируется детектором 2 (рисунок 2б). Длина подложки волновода составляет – 20 мм, толщина 2 мм.

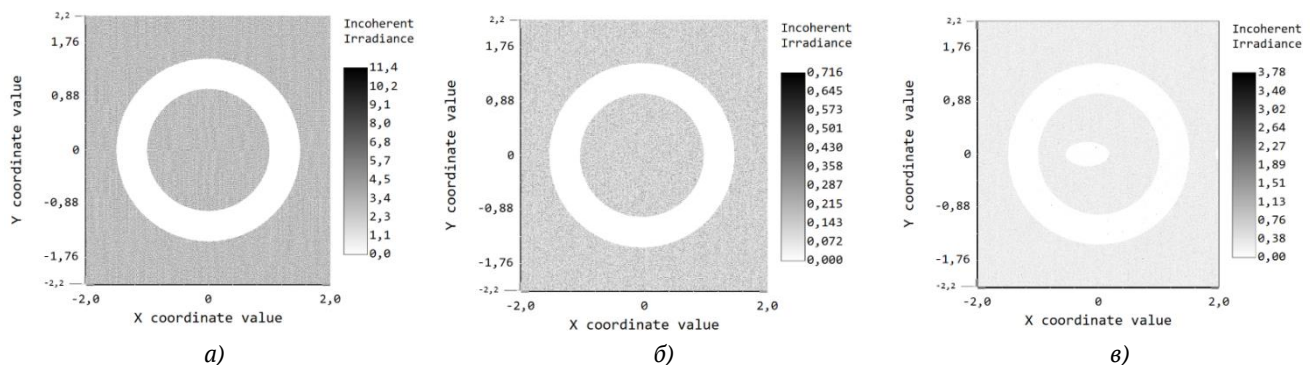


Рис. 2. Изображения, зарегистрированные детектором: (а) – детектор 1; (б) – детектор 2 при отсутствии дефекта; (3) – детектор 2 при наличии дефекта

В результате проведён анализ изменения распределения освещенности при прохождении дефектов (свилей, пузырей), при различных значениях ошибок поверхности N , ΔN подложки. В случае наличия местного дефекта в материале, наблюдалось рассеяние в области его локализации, а также общее падение интенсивности освещенности и локальные паразитные вкрапления высокой интенсивности (рисунок 2в).

При проведении исследований согласно предложенной методике определено, что оптимальными параметрами подложки с точки зрения падения интенсивности, появления шумов, аберраций и т.п. являются следующие: значения общей и местной ошибок поверхности должны составлять [4] не более 4 и 0,5 колец соответственно, категория и класс пузырности – 5А (что соответствует максимальному размеру пузыря не более 0,5 мм и количеству пузырей диаметром свыше 0,03 мм в 1 кг не более 3 шт.), категория бессвильности – 3 (не допускаются видимые в проходящем свете потоки свилей; допускаются одиночные и узловые свили).

Благодарность

Исследование проведено в МГТУ им. Баумана в рамках реализации НИР по программе «Приоритет 2030».

Список источников

- [1] Xiong J. et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives //Light: Science & Applications. – 2021. – Т. 10. – №. 1. – С. 216.
- [2] Solomashenko A. et al. Image Quality for Near-Eye Display Based on Holographic Waveguides //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 21. – С. 11136.
- [3] Äyräs P., Saarikko P., Levola T. Exit pupil expander with a large field of view based on diffractive optics //Journal of the Society for Information Display. – 2009. – Т. 17. – №. 8. – С. 659-664.
- [4] Сокольский М. Н. Допуски и качество оптического изображения //Л.: Машиностроение. – 1989. – Т. 234.

Evaluation of the influence of optical material errors on the image quality of an AR device based on a waveguide

O. Afanaseva, A. Solomashenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

An important factor that affects the quality of the image displayed by a waveguide-based augmented reality device is the characteristic of the optical material. Determining the requirements for optical uniformity, inclusions, bubbles, general and local errors in the process of developing documentation for a waveguide and manufacturing a substrate must be justified. A description of various mathematical models for assessing the impact of optical material errors on image quality is described in this report.

Keywords: Waveguide, Augmented reality, Optical glass, Bubble, Inclusion, Image Quality.

Ахроматические изображающие линзы с несколькими фокусами

С. Е. Дубынин¹, С. С. Копёнкин², А. Н. Путилин³, А. В. Морозов, Н. А. Путилин³,
Ю. П. Бородин², В. В. Дружин⁴

¹ ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва, Россия

² РТУ МИРЭА, Москва, Россия

³ МИИГАиК, Москва, Россия

⁴ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе рассмотрены полноцветные голографические/дифракционные оптические элементы (ГОЭ/ДОЭ) для переноса изображения, в частном случае, из точки в точку, и одновременно мультиплицирующие изображение в четыре подобных изображения. Также затронуты вопросы моделирования и записи таких элементов и их эффективности. Отличительной особенностью данных оптических элементов является вариант их использования в системах дополненной или смешанной реальности для увеличения размера зрачка, который критически снижается при увеличении поля зрения системы. Авторами предложены несколько модификаций таких элементов. Была достигнута суммарная эффективность таких элементов 30-40% для каждой из трех длин волн в системе RGB.

Ключевые слова: Голографический оптический элемент, Многофокусная линза, Размножитель зрачка.

Цитирование: Дубынин, С. Е. Ахроматические изображающие линзы с несколькими фокусами / С. Е. Дубынин, С. С. Копёнкин, А. Н. Путилин, А. В. Морозов, Н. А. Путилин, Ю. П. Бородин, В. В. Дружин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 186–190.

Информационные технологии развиваются безумными темпами и также быстро и все сильнее внедряются в нашу повседневную жизнь: многими процессами управляет искусственный интеллект, а человек все чаще погружается в виртуальный мир. VR-технологии становятся узкоспециализированными и отодвигаются на второй план, а им на смену приходит дополненная/смешанная реальность (AR, MR, XR), которая более удачно вписывается в современные многозадачность и темп.

Решая задачу удобства и компактности устройств дополненной реальности, наш коллектив собрал схему записи и изготовил полноцветные (R - 640нм, G - 532нм, B - 460нм) образцы голографического оптического элемента (ГОЭ) для подобных гаджетов. Поле зрения ГОЭ составляет 90°, дифракционная эффективность порядка 45%, однородность по полю свыше 80% для каждой длины волны, но зрачок при этом всего 1.5 мм, что при таком огромном поле является существенной проблемой. Наиболее оптимальным решением данной задачи является размножение зрачка [1-4].

Сначала был выбран наиболее простой путь – размножить уже имеющийся зрачок. Данный случай имеет несколько возможных реализаций: световодный режим (между двумя полупрозрачными зеркалами (рисунок 1) или двумя дифракционными решетками (рисунок

2)); многослойная структура из нескольких одинаковых ГОЭ со смещением для разнесения зрачков в пространстве (рисунок 3).

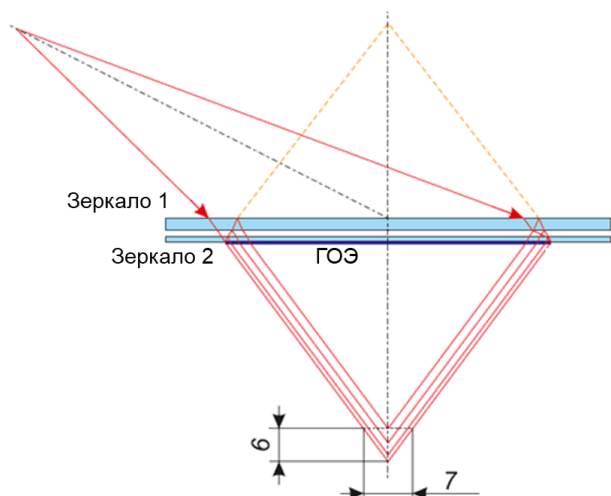


Рис. 1. Оптическая схема с двумя полупрозрачными зеркалами

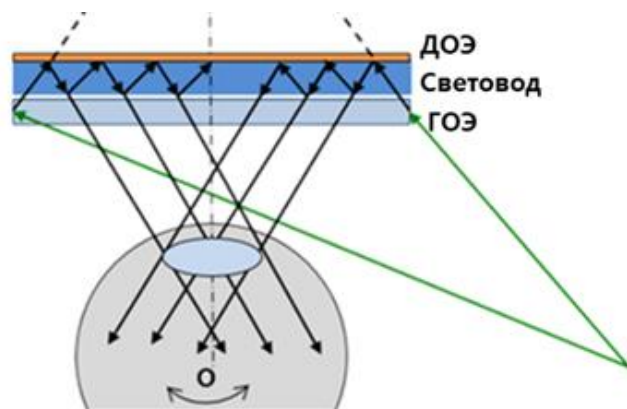


Рис. 2. Оптическая схема с двумя дифракционными решетками

Каждый из этих вариантов обладает своими существенными недостатками: в первом случае происходит размножение зрачка вдоль оси визирования, а также происходит снижение яркости от зрачка к зрачку; во втором варианте размножение происходит в нужной плоскости, но также за счет фиксированного фокуса ГОЭ-линзы зрачки также имеют и продольное смещение; главный недостаток третьего варианта – попадание в зрачок одновременно нескольких изображений, а продольный сдвиг зрачков может быть скомпенсирован за счет использования ГОЭ с разными фокусными расстояниями. Эксперименты подтвердили наличие данных проблем. В ходе экспериментов для записи ГОЭ использовался материал Covestro Bayfol NX 200 и NX 120, а ДОЭ регистрировалось как интерференция двух плоских волн от гелий-кадмиевого лазера на фоторезисте Shipley с последующим снятием УФ-полимерной копии для последующей работы с полноцветным изображением.

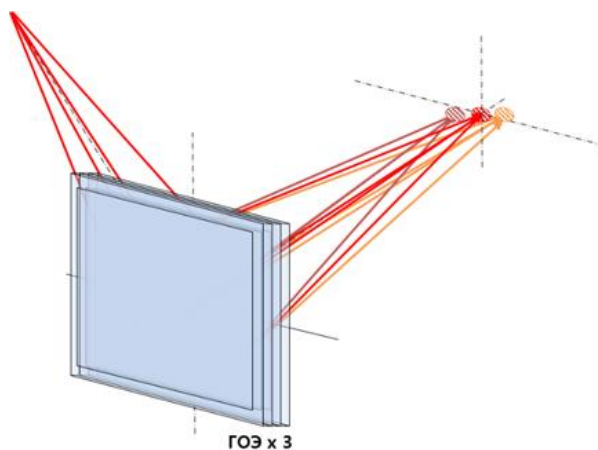


Рис. 3. Многослойная структура из нескольких одинаковых

В дальнейшем было решено осуществить запись многофокусного ГОЭ: перенос из одной точки в несколько. Для этой цели разработана принципиальная оптическая схема (рисунок 4), где в предметной ветви сформировано 4 отдельных канала с наклоном оптической оси, соответствующим повороту глаза при смене направления наблюдения.

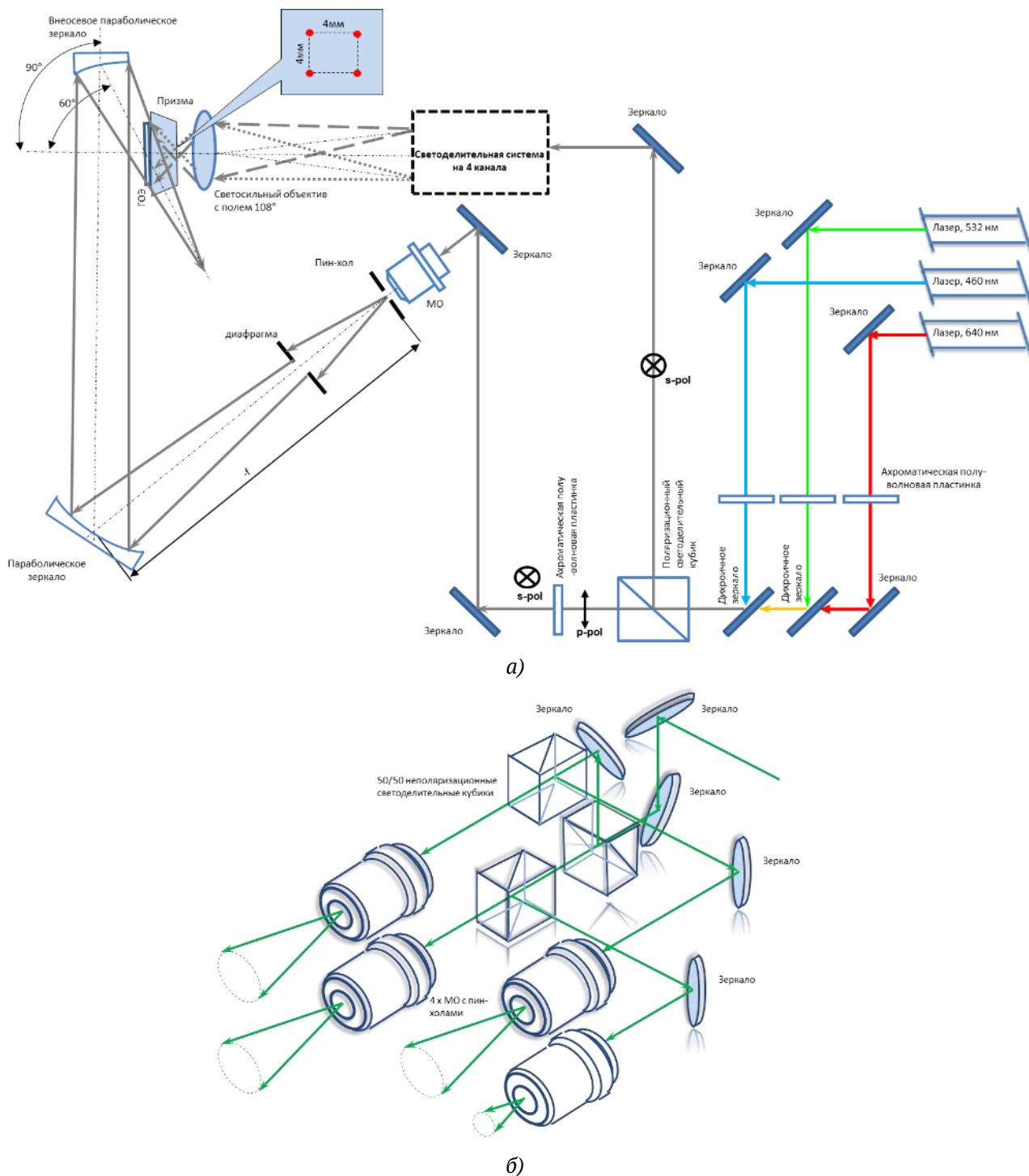


Рис. 4. Оптическая система: а) принципиальная оптическая схема записи, б) светоделительная система на 4 канала

Запись одновременно всех четырех предметных каналов оказалась удачной, а шумы за счет подобранных соотношений сигнал/опора и времени экспозиции удалось подавить и свести к минимуму их влияние. Итоговый результат представлен на рисунке 5.

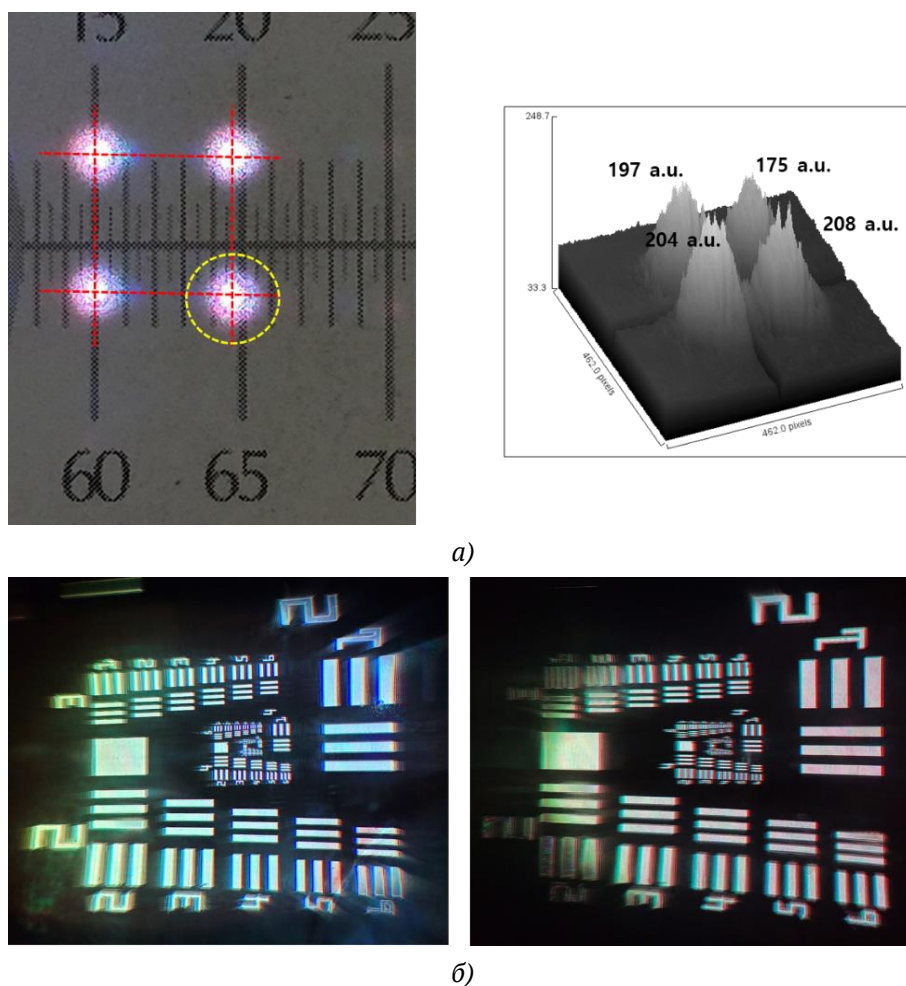


Рис. 5. Результаты: а) формируемые ГОЭ зрочки и их яркость, б) пример изображения тест-объекта в разных зрочках на стенде

В заключении стоит отметить достижение поставленной задачи по увеличению зрочка системы за счет его размножения при сохранении поля зрения 90° при оптимальном снижении яркости (или не существенном повышении требований к источнику, формирующему исходное изображение).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Seong-Bok Kim** Optical see-through Maxwellian near-to-eye display with an enlarged eyebox / Seong-Bok Kim and Jae-Hyeung Park // Optics Letters Vol. 43, No. 4, (15 February 2018)
- [2] **Tiegang Lin** Maxwellian near-eye display with an expanded eyebox / Tiegang Lin, Tao Zhan, Junyu Zou, Fan Fan, and Shin-Tson Wu // Optics Express 38616 Vol. 28, No. 26 (21 December 2020)
- [3] **Патент № 2023/0 134 565 US.** Display apparatus providing expanded eye box / Wontaek Seo, Daeho Yang, Sunil Kim, Bongsu Shin, Geeyoung Sung, — Оpubл. 04.05.2023.
- [4] **Патент № 2022/ 11 487 117 US.** Display apparatus having wide viewing window/ Sunil Kim, Druzhin Vladislav, Malinina Polina, Bongsu Shin, Dubynin Sergey, — Оpubл. 01.11.2022.

Multifocal achromic imaging lenses

*S. E. Dubynin¹, S. S. Kopenkin², A. N. Putilin³, A. V. Morozov, N. A. Putilin³, Y. P. Borodin²,
V. V. Druzhin^{1,4}*

¹ Samsung R&D Institute Rus (SRR), Moscow, Russia

² MIREA, Moscow, Russia

³ MIIGAiK, Moscow, Russia

⁴ BMSTU, Moscow, Russia

The paper presents the holographic/diffraction optical elements (HOE/DOE) for “point-to-point” transmitting of image or more correcting “point-to- several points”. Discuss questions of modeling and recording scheme, efficiency (energy distribute between all points). Main advantage of these HOE/DOE is usage in AR-, MR-systems for increasing of eye-box, because it is smaller at large field of view (FoV). Authors propose several modifications of this HOE/DOE. Diffraction efficiency (DE) was achieved about 30-40% for each color of RGB-system.

Keywords: Holographic optical element, Multi-focal lens, Multiplying of eye-box.

Использование оптических эффектов для современных защитных технологий с применением метода струйной печати

А. В. Виноградов, Т. Н. Погосян, А. А. Смирнов, Ш. Ф. Мустафин, М. И. Морозов
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Струйная печать обладает неоспоримыми достоинствами: экономичность, скорость и масштабируемость. Простое покапельное нанесение чернил объемом в несколько пиколитров на подложку может привести к многообразию получаемых оптических эффектов, связанных с микро- и наноструктурированием из-за химических особенностей состава чернил, условий печати, предварительной и постобработки поверхности, а также ее химических и физических параметров. В докладе будут представлены реальные исследования нашей группы, и на их примере продемонстрированы различные виды голограмм (радужные, зеркальные, фазовые, опаловые, скретч-голограммы), оптические микро- и наноструктуры, планарные волноводы, микрорезонаторы, высокорелрактивные и низкорелрактивные дисперсии, полученные методом струйной печати.

Ключевые слова: Струйная печать, Наноструктуры, Фотоника, Растворная химия.

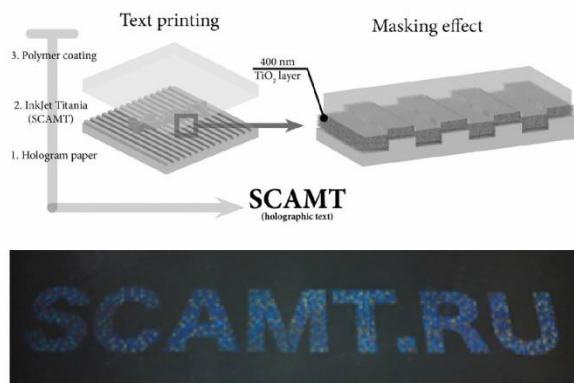
Цитирование: Виноградов, А. В. Использование оптических эффектов для современных защитных технологий с применением метода струйной печати / А. В. Виноградов, Т. Н. Погосян, А. А. Смирнов, Ш. Ф. Мустафин, М. И. Морозов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 191–195.

Введение

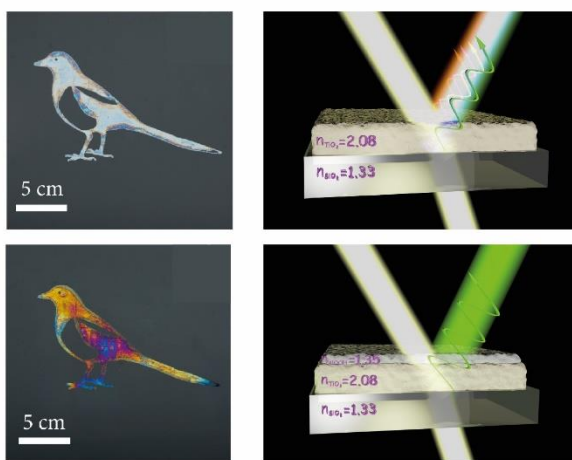
За последние десятилетия струйная печать превратилась из способа печати документов и изображений в технологию, которая может быть использована для создания сложных структур и даже устройств. Функциональные материалы со специфическими электрическими, оптическими, химическими, биологическими или структурными свойствами расширили возможности струйной печати, как время- и ресурсоэффективной аддитивной технологии, в том числе в области защитных технологий. Идеальный способ борьбы с подделкой должен быть недорогим, серийно производимым, неразрушимым и не клонируемым, а также удобным для аутентификации. Хотя было разработано много технологий по борьбе с подделкой, очень немногие из них удовлетворяли всем вышеперечисленным требованиям. Со своей стороны при поддержке коммерческих партнеров мы исследуем технологии струйной печати, совмещая их с функциональными материалами, обладающими специфическими свойствами для получения визуальных оптических эффектов.

Оптические эффекты методом струйной печати

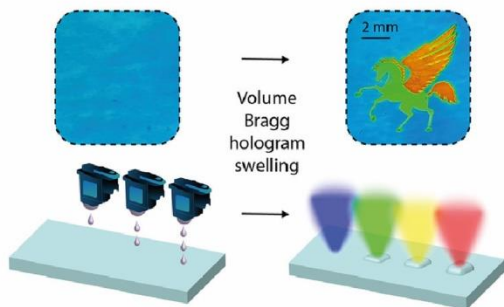
В основе финального результата защитного элемента лежит сочетание особенных свойств чернил, подложки и параметров печати. Например, бесцветные чернила с наночастицами диоксида титана обладают высоким показателем преломления.



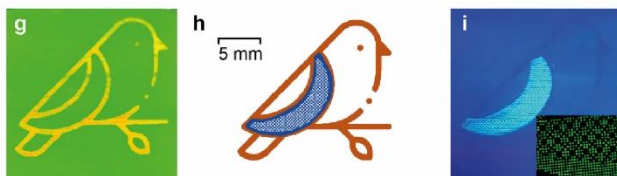
а) радужная голограмма на бумаге [1]



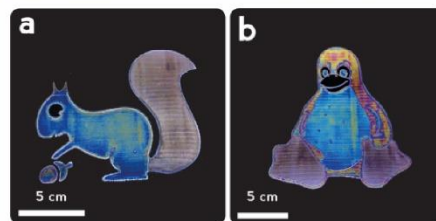
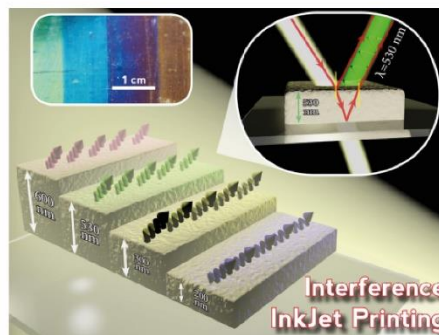
в) противотражающее покрытие [3]



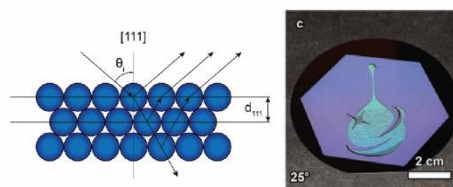
е) печатная голограмма на объемной брэгговской решетке [6]



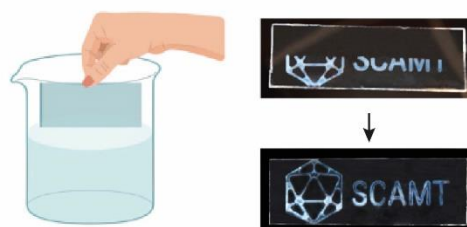
ж) дифракционное и люминесцентное изображение [7]



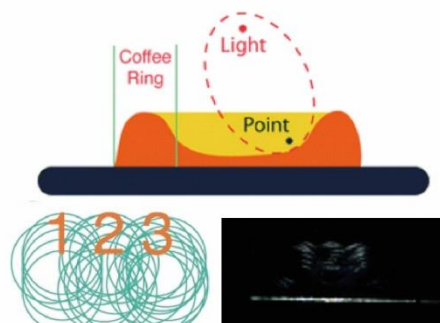
б) цветное изображение в тонких пленках [2]



г) опаловая голограмма [4]



д) опаловая голограмма в геле [5]



з) скретч-голограмма [9]

Рис. 1. Примеры печати оптических структур для различного применения.

Используя в качестве подложки бумагу на основе полиэтилентерефталата с микротеснением, можно обеспечить голографический эффект путем нанесения высоко рефрактивных чернил

с помощью офисного принтера с последующим нанесением защитного полимерного слоя (рис. 1а) [1]. Чернила на основе диоксида титана также нашли применение и в печати многоцветного изображения [2]. В основе полученного эффекта лежит дифракция в тонких пленках, толщину которых можно контролировать послойной печатью, как показано на рис. 1б. Для повышения видимости изображения было использовано противоотражающее покрытие на основе бёмита, которое снижало «фоновое» отражение и повышало видимость целевого изображения (рис. 1в) [3].

Использование беспигментных чернил со сложной для копирования структурной упорядоченностью является перспективным методом изготовления элементов защиты от подделок. В работе [4] цветопередача обеспечена разницей диаметра полистирольных сфер, которыми напечатаны элементы изображения. Оптический эффект возникает в результате изменения условий дифракции (рис. 1г). На основе полистирольных сфер были синтезированы другие чернила, включенные в хитозановые гидрогели, которые позволяли делать видимым изображение при погружении в воду (рис. 1д) [5].

В работе [6] снова демонстрируется сочетание беспигментных фотоотверждаемых чернил на основе акрилатов с голографической коммерческой подложкой. Дозированное нанесение чернил методом струйной печати позволяло контролировать физическое набухание подложки, что визуально сопровождалось изменением цвета голограммы, вызванное изменением условий дифракции (рис. 1е). Последующее дополнение изображения люминесцентным паттерном на основе перовскитных кристаллов [7] привело к получению комбинированного изображения на основе двух оптических эффектов – дифракции и люминесценции (рис. 1ж). Еще один оптический эффект доступный для реализации беспигментными чернилами – это проявление изображения в поляризованном свете. В работе [8] для получения такого изображения использовались анизотропные нанокристаллы целлюлозы (рис. 2а)

К параметрам печати так же относятся условия сушки чернил. Эффект «кофейного кольца» вызван капиллярными течениями при высыхании капли и во многих исследованиях считается нежелательным. Однако этот механизм был использован при получении скретч-голограмм, представленных в работе [9]. Объемное изображение достигалось путем управления движением зеркальных бликов на поверхности напечатанных вогнутых структур (рис. 1з).

Полученные в ходе исследований результаты были применены и в других направлениях. В работе [10] чернила с наночастицами диоксида титана использовались для управляемой печати оптических волноводов для одномодовой работы в ИК диапазоне (рис. 2б). Эти же чернила были использованы для разработки биосенсоров определяющих концентрацию ферментов глюкозы и холестерина. Диоксид титана был использован для обнаружения перекиси водорода, которая получается при окислении субстрата ферментами оксидазы (рис. 2в). Исследованные перовскитные чернила были использованы для создания лазирующих структур – резонаторов на модах шепчущей галереи (рис. 2г), - которые в сочетании с

волноводами на диоксиде титана позволили получить оптический элемент. Полученные результаты приняты к публикации.

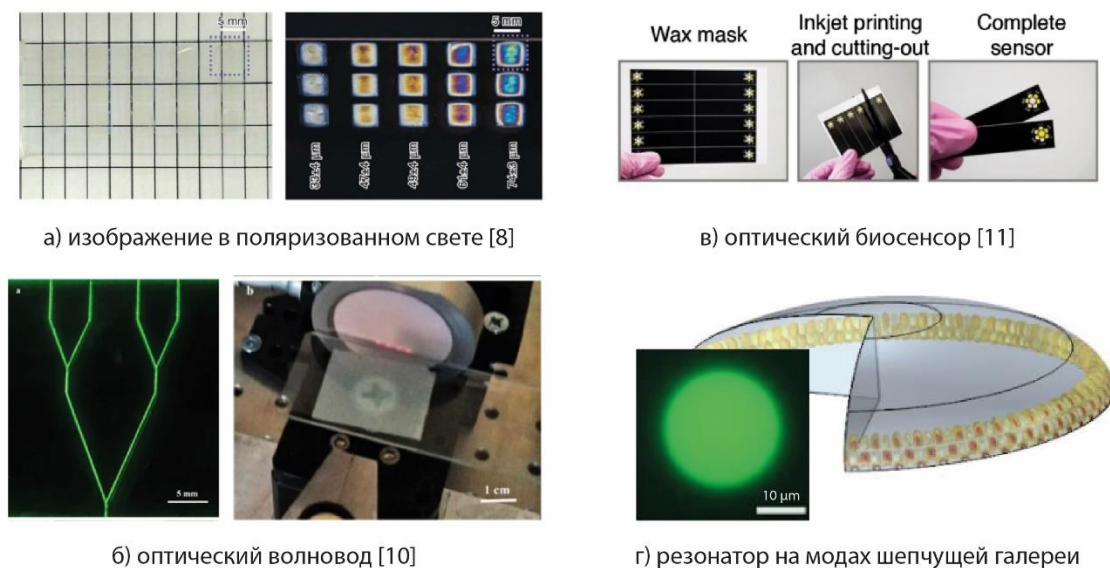


Рис. 2. Примеры печати оптических структур для различного применения.

Заключение

Данная работа демонстрирует многообразие применения метода струйной печати с учетом варьирования параметров печати, типа подложки и функциональных материалов, которые представлены в широком диапазоне от простого раствора полимера до современных дисперсий наночастиц. В результате представлен ряд голографических изображений (радужные, зеркальные, фазовые, опаловые), а также волноводы, лазерующие структуры и биосенсоры с визуальным окрашиванием.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 21-79-10202).

Список источников

- [1] **Yakovlev, A. V.** Sol-gel assisted inkjet hologram patterning / A. V. Yakovlev, V. A. Milichko, V. V. Vinogradov, A. V. Vinogradov // *Advanced Functional Materials*. – 2015. – Vol 25. – № 47. – P. 7375-7380.
- [2] **Yakovlev, A. V.** Inkjet Color Printing by Interference Nanostructures / A. V. Yakovlev, V. A. Milichko, V. V. Vinogradov, A. V. Vinogradov // *ACS Nano*. – 2016. – Vol 10. – № 3. – P. 3078-3086.
- [3] **Yakovlev, A. V.** Inkjet printing of TiO₂/AlOOH heterostructures for the formation of interference color images with high optical visibility / A. V. Yakovlev, V. A. Milichko, E. A. Pidko, V. V. Vinogradov, A. V. Vinogradov // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol 6. – P. 37090.
- [4] **Keller, K.** Inkjet Printing of Multicolor Daylight Visible Opal Holography / K. Keller, A. V. Yakovlev, E. V. Grachova, A. V. Vinogradov // *Advanced Functional Materials*. – 2018. – Vol 28. – P. 1706903.
- [5] **Neterebskaia, V.** Inkjet Printing Humidity Sensing Pattern Based on Self-Organizing Polystyrene Spheres / V. O. Neterebskaia, A. O. Goncharenko, S. M. Morozova, D. S. Kolchanov, A. V. Vinogradov // *Nanomaterials*. – 2020. – Vol 10. – № 8. – P. 1538.

- [6] **Pogosian, T.** Inkjet assisted patterning of Bragg grating towards multiple color imaging / T. Pogosian, T. Statsenko, A. Mukhtudinova, M. Masharin, D. Bugakova, A. Sergienko, S. Makarov, A. Vinogradov // *Applied Materials Today*. – 2022. – Vol 26. – P. 101289.
- [7] **Smirnov, A.** Structural color image augmented by inkjet printed perovskite patterning / A. Smirnov, T. Pogosian, L. Zelenkov, S. Butonova, S. Makarov, A. Vinogradov // *Applied Materials Today*. – 2022. – Vol. 28. – P. 101545.
- [8] **Eremeeva, E.** Printing of Colorful Cellulose Nanocrystalline Patterns Visible in Linearly Polarized Light / E. Eremeeva, E. Sergeeva, V. Neterebskaia, S. Morozova, D. Kolchanov, M. Morozov, I. Chernyshov, V. Milichko, A. Vinogradov // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2020. – Vol 12. – № 40. – C. 45145-45154.
- [9] **Slabov, V.** Inkjet printing of specular holograms based on a coffee-ring effect concave structure / V. Slabov, A. V. Vinogradov, A. V. Yakovlev // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2018. – Vol 6. – P. 5269-5277.
- [10] **Klestova, A.** Inkjet Printing of Optical Waveguides for Single-Mode Operation / A. Klestova, N. Cheplagin, K. Keller, V. Slabov, G. Zaretskaya, A. V. Vinogradov // *Advanced Optical Materials*. – 2019. – Vol 7. – № 2. – P. 1801113.
- [11] **Safaryan, S. M.** Inkjet printing of the chromogen free oxidase based optical biosensors / S. M. Safaryan, A. V. Yakovlev, A. V. Vinogradov, V. V. Vinogradov // *Sensors and Actuators B*. – 2017. – Vol 251. – P. 746–752.

Using optical effects obtained by the inkjet printing method toward modern security technologies

A. V. Vinogradov, T. N. Pogosian, A. A. Smirnov, S. F. Mustafin, M. I. Morozov
ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

Inkjet printing has undeniable advantages: economy, speed and scalability. Simple deposition of a few picolitres of ink onto a substrate can lead to a variety of optical effects associated with micro- and nanostructuring due to ink chemistry, printing conditions, surface pre- and post-treatment, and its chemical and physical parameters. The report will present real studies of our group. Using them as an example, we will demonstrate the fabrication of various types of holograms (rainbow, mirror, phase, opal, scratch holograms), optical micro- and nanostructures, planar waveguides, microresonators, high-refractive and low-refractive dispersions obtained by the inkjet printing method.

Keywords: Inkjet printing, Nanostructures, Photonics, Solution chemistry.

Поверхностно-рельефные голограммы. Современное состояние и перспективы

А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин

ООО «Джеймс Ривер Бранч», Москва, Россия

В докладе дан обзор современного состояния технологии и рынка поверхностно-рельефных голограмм. Рассмотрены мотивы применения голограмм потребителями и приведены оценки объемов продаж. Включены фото и видеоматериалы, иллюстрирующие наиболее распространенные формы применения голограмм и перспективные визуальные эффекты.

Ключевые слова: Оптика, Голография, Поверхностно-рельефные голограммы.

Цитирование: Смык, А. Ф. Поверхностно-рельефные голограммы. Современное состояние и перспективы / А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 196–198.

Изготовление поверхностно-рельефных голограмм создало голографическую промышленность. Эти голограммы, как правило, изготавливаются перенесением рельефа с металлической матрицы на термопластичную пленку на голографических эмбосерах (прокаточных машинах) при давлении и температуре [1-2]. Производительность значительна при небольших затратах, высота рельефа составляет доли мкм. Это обусловило востребованность голограмм и их хорошую совместимость с другими полиграфическими технологиями, в том числе, защитными.

Основные мотивы применения голограмм – защита, декорирование, образование. По объему продаж (около 5.3 млрд. \$ в 2023 г.) доминируют защитные голограммы [3], но в последние годы декоративные применения для упаковки неуклонно растут (одновременно со средним размером голограммы). ИНМА оценивает объем продаж в 188 млрд. \$ к 2025 году (вместе с самой упаковкой) [4]. Часто голографическая упаковка несет и защитную функцию. Применение в образовании, культуре, здравоохранении, прикладных исследованиях в стоимостном выражении не может сравниться с защитой и упаковкой, но устойчиво развивается. Оно способствует благосклонному отношению к голографии конечного потребителя.

Наиболее распространенные формы применения поверхностно-рельефных голограмм:

- самоклеящаяся разрушаемая этикетка;
- фольга горячего (холодного) тиснения;
- прозрачные ламинаты на ID;
- ламинаты на жесткой упаковке;
- рельефная пленка на упаковке;
- ныряющая нить, отрывная лента;
- рельеф, сформированный на месте;
- глиттер;

– внешняя коррекция ранее сформированного рельефа.

Как видно из этого перечня, технология применения голограмм отработана хорошо и разнообразно. Тем не менее поверхностно рельефным голограммам есть куда совершенствоваться. Среди наиболее очевидных направлений развития:

- смягчение требований к условиям освещения;
- повышение яркости и чистоты цветов;
- усиление роли признаков «неосведомленной идентификации»;
- повышение технологического барьера для поддельщиков;
- сохранение невысокой цены и технологической совместимости с полиграфией и упаковкой;
- снижение воздействия на природу.

Достичь этих целей можно, например, применением:

- голограмм с асимметричным профилем, в том числе нулевого порядка;
- голограмм со сниженными требованиями к освещению (кристалл, бронза, трекограммы);
- точным комбинированием различных типов голограмм и оптических элементов;
- плазмонных голограмм.

Поверхностно-рельефные голограммы далеко не исчерпали своих возможностей и остаются локомотивом голографии.

Список источников

- [1] **Iwata, F.** Characteristics of a photoresist hologram and its replica / F. Iwata, J. Tsujiuchi // Applied Optics. — 1974. — 13. — № 2. — P. 1327–36.
- [2] **Fagan, W.** Optical Security & Anticounterfeiting Systems / W. F. Fagan // Proceedings of the SPIE. — 1990. — 10308.
- [3] Security Holograms Market Insights & Industry Trends by 2033 / URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/security-holograms-market>
- [4] Growth for Holography in 2022 as Covid and Other Threats Continue to Impact - International Hologram Manufacturers Association / URL: <https://ihma.org/growth-for-holography-in-2022-as-covid-and-other-threats-continue-to-impact/>.

Surface-relief holograms. State of the art and development prospects

A. Smyk, A. Shurygin

James River Branch LLC, Moscow, Russia

This report provides an overview of the state of the art of embossed holograms as the most common and most effective commercial technology. The reasons for applying holograms as protective elements, eye catching element, stimulate sales and illustrative applications are considered. The common forms of holographic products are analyzed. Some market estimates are given. Directions for the embossed holograms development are proposed.

Keywords: Optics, Holography, Surface-relief holograms.

Тиражируемые защитные метки, содержащие случайный рельеф, и контроль их подлинности

А. М. Смолович¹, Л. Д. Клебанов², И. Д. Лактаев¹, А. П. Орлов^{1,3,4}, П. А. Смолович⁵,
А. В. Фролов¹, О. В. Бутов¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия

² IPG Photonics Corp., Oxford, MA, USA

³ Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Москва, Россия

⁴ Институт бионических технологий и инжиниринга, Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова, Москва, Россия

⁵ Twilio Spain SL, Madrid, Spain

Можно исключить возможность контактного копирования голографического рельефа традиционных защитных голограмм, но нельзя исключить возможность их голографического копирования, при котором восстановленная голограммой волна регистрируется повторно на голограмме-копии. В работе экспериментально реализована защитная метка, содержащая участок случайного диффузного рельефа. Голографическое копирование участка невозможно, поскольку он не является голограммой. Участок случайного рельефа является практически уникальным, что позволяет использовать его в качестве защитного элемента. Для идентификации подлинности защитной метки регистрировались спекл-картины, сформированные репликами, как с одного и того же, так и с другого участков случайного рельефа. Затем вычислялась их кросс-корреляция. Предполагается, что предложенные защитные метки могут производиться на стандартном оборудовании, для тиражирования защитных голограмм.

Ключевые слова: Защитная метка, Идентификации подлинности, Случайный рельеф, Спекл, Корреляция.

Цитирование: **Смолович, А. М.** Тиражируемые защитные метки, содержащие случайный рельеф, и контроль их подлинности / А. М. Смолович, Л. Д. Клебанов, И. Д. Лактаев, А. П. Орлов, П. А. Смолович, А. В. Фролов, О. В. Бутов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 199–203.

Обычно традиционные защитные голограммы надежно защищают от контактного копирования голографического рельефа. Однако нельзя исключить возможность их голографического копирования. При голографическом копировании изображение с голограммы восстанавливается пучком когерентного света и производится повторная регистрация голограммы восстановленного изображения. На голограмму-копию, имеющую фазовый рельеф, может быть нанесено металлическое покрытие. Затем методом гальванопластики по стандартной технологии может быть изготовлена металлическая матрица, которая может быть использована для тиражирования копий исходной защитной голограммы методом тиснения.

В докладе обсуждается защитная метка, допускающий массовое тиражирование, подобное тиражированию защитных голограмм, но исключая возможность

голографического копирования. Это достигается тем, что предлагаемая защитная метка содержит фазовый рельеф, который является не голограммой, а участком случайного диффузного рельефа [1, 2]. Участок случайного рельефа, содержащий достаточно большое количество неоднородностей, является практически уникальным. В то же время, он может тиражироваться методом тиснения, как обычная рельефная голограмма. Голографическое копирование участка случайного рельефа невозможно, так как это не голограмма. Для защиты от контактного копирования подходят методы, разработанные для защитных голограмм. Фотографическое копирование случайного рельефа также невозможно, так как рельеф трехмерный. Конечно, можно зарегистрировать голограмму рельефа, но отличить рельеф от его голограммы, не составляет труда.

В случае если у нас имеется подлинная защитная метка и метка, подлинность которой требуется проверить, то идентификацию ее подлинности производится следующим образом. Участок случайного рельефа проверяемой защитной метки, освещают пучком когерентного света, в результате чего образуется спекл-картина [3], которую сравнивают с аналогичной спекл-картиной подлинной защитной метки при использовании одинаковой оптической схемы. Если бы участки случайного рельефа были идентичны, то и спекл-картины рассеянного ими света также должны были бы быть идентичны. На практике профиль рельефа разных копий подлинных меток будет иметь небольшие отличия, также всегда присутствуют неточности установки метки в оптическую схему, шум приборов и т.п. Поэтому соответствующие спекл-картины будут немного отличаться. Для определения величины этого различия вычисляется коэффициент корреляции указанных спекл-картин. Если этот коэффициент корреляции превысит установленный порог, делается вывод о подлинности проверяемого оптического защитного элемента. Величина порога устанавливается из соображений обеспечения надежной идентификации при наличии реальных неточностей.

Чтобы по идентичности спекл-картин сделать вывод о подлинности проверяемой защитной метки, также надо исключить случай, когда вместо метки, содержащей участок со случайным рельефом, используется ее голограмма. Для этого операцию освещения проверяемой и подлинной защитных меток пучками когерентного излучения и сравнения спекл-картин повторяют несколько раз, при этом длина волны излучения и/или угол падения освещающего пучка изменяются одинаковым образом, как для участка трехмерного рельефа проверяемой защитной метки, так и для соответствующего участка трехмерного рельефа подлинной защитной метки. Тогда, если проверяемая защитная метка также является подлинной, соответствующие спекл-картины останутся идентичными, а если проверяемая защитная метка является голограммой подлинной метки, соответствующие спекл-картины будут отличаться друг от друга.

Трехмерный рельеф защитной метки может содержать элементы, доступные визуальному наблюдению в процессе идентификации. В этом случае в процессе идентификации подлинности элементы рельефа могут наблюдаться невооруженным глазом и/или в оптический микроскоп. Для тиражирования и приклеивания защитной метки

предлагается использовать такие же технологические операции, что и для голографических защитных меток. Поэтому, не вызывает никаких дополнительных трудностей использование комбинированных защитных меток, трехмерный рельеф которых, помимо участков, содержащих шероховатую поверхность, также содержит голографические участки.

В эксперименте в качестве модели защитных меток использовались полимерные реплики со шлифованной поверхности фторопластовой пластины. Фторопласт был выбран для уменьшения адгезии. Тонкий слой УФ отверждаемого фотополимера наносился на поверхность подложки, в качестве которых использовались стеклянные и кварцевые пластинки. Подложка с нанесенным слоем полимера совмещалась с поверхностью фторопластовой пластины под оптическим микроскопом, а затем производилось экспонирование фотополимера УФ лампой. Толщина слоя фотополимера после совмещения контролировалась с помощью твердых ограничителей, расположенных по периметру участка копируемой поверхности, и составляла 50 мкм. Поперечные размеры рабочего поля реплики составляли от 5×5 до 10×10 мм². Для увеличения отражательной способности реплик на поверхность случайного рельефа методом магнетронного напыления наносился слой рутения толщиной 100 нм. Коэффициент пропускания такой пленки составлял $2,9 \times 10^{-3}$.

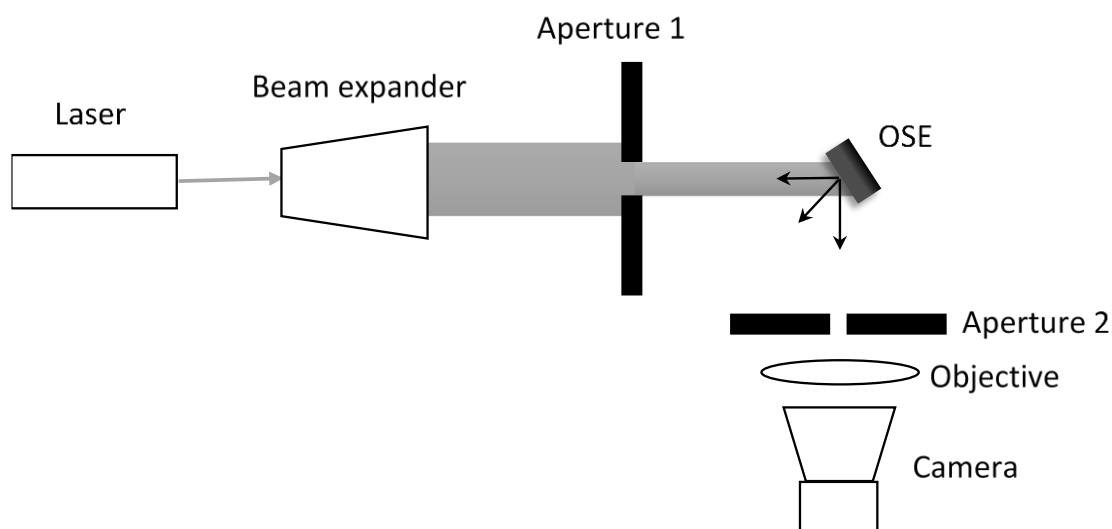


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента по идентификации подлинности меток

Оптическая схема эксперимента по идентификации подлинности защитных меток показана на Рис. 1. Использовался полупроводниковый лазер с длиной волны света 0,65 мкм, мощность лазерного пучка могла регулироваться в диапазоне 0,1-2 мВт. Спекл-картина регистрировалась цифровой фотокамерой USB микроскопа Supereyes B011 с разрешением 2594×1922 пикселей и размером одного пикселя на КМОП матрице $2,2 \times 2,2$ мкм. Средний размер спеклов регулировался величиной ирисовой диафрагмы, установленной перед объективом. Оптимальный средний линейный размер спеклов составлял 5-10 пикселей. Для сравнения спекл-картин, они вводились в компьютер и обрабатывались специально разработанной программой, которая вычисляла их корреляцию. Работа алгоритма

программы состояла в перемещении изображения одной спекл-картины относительно изображения другой и вычислении скалярного произведения двух матриц. Корреляция произвольного изображения с идентичным всегда будет равна 1, для случайных изображений их кросс-корреляция будет близка к 0. Поскольку спекл-картины разных реплик могли быть слегка повернуты относительно друг друга, помимо стандартных сдвигов матрицы, расчеты проводились при различных поворотах. Полученные в результате обработки снимков спекл-картин значения коэффициентов кросс-корреляции показаны в Таблице 1. Здесь 1B и 1D реплики с первого участка случайного рельефа, а 2A и 2F – со второго. Можно видеть, что корреляция между спекл-картинами, соответствующими репликам с одного и того же участка случайного рельефа, значительно превышает корреляцию, соответствующую репликам с разных участков.

Таким образом, в работе предложены и реализованы защитные метки, содержащие случайный рельеф, которые не допускают голографического копирования. Экспериментально показано, что по корреляции спекл-картин рассеянного излучения можно надежно установить, является ли проверяемая метка подлинной. Предполагается, что защитные метки могут производиться на стандартном оборудовании, для тиражирования защитных голограмм.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Авторы благодарят А.А Златопольского за полезные обсуждения методов обработки изображений, а А. С. Ильина за консультации по технологии снятия реплик и за нанесение отражающего покрытия на реплики.

Таблица 1. Кросс-корреляции спекл-картин, сформированных репликами с двух участков случайного рельефа

№	1B	1D	2A	2F
1B	1.0	0.93	0.06	0.08
1D	0.93	1.0	0.05	0.06
2A	0.06	0.05	1.0	0.82
2F	0.08	0.06	0.82	1.0

Список источников

- [1] **Патент № 2 706 825 РФ.** Способ защиты объектов от подделки путем нанесения защитной метки / А. М. Смолевич. — Оpubл. 21.11.2019.
- [2] **Патент № 037595 Евразийский патент.** Способ защиты объектов от подделки путем нанесения защитной метки / А. М. Смолевич. — Оpubл. 20.04.2021.
- [3] **Goodman, J. W.** Some fundamental properties of speckle. / J. W. Goodman // J.Opt.Soc.Am. — 1976. — Vol 66. — № 11. — P. 1145–1150.

Replicable security labels containing random relief and control of their authenticity

A. M. Smolovich¹, L. D. Klebanov², I. D. Laktaev¹, A. P. Orlov^{1,3,4}, P. A. Smolovich⁵, A. V. Frolov¹, O. V. Butov¹

¹Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics (IRE) of the Russian Academy of Sciences, Mokhovaya 11-7, Moscow 125009, Russia

²IPG Photonics Corp., Oxford, MA, USA

³Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Institute for Bionic Technologies and Engineering, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

⁵Twilio Spain SL, Madrid, Spain

It is possible to exclude the possibility of contact copying of the holographic relief of traditional security holograms, but one cannot exclude the possibility of their holographic copying, in which the wave reconstructed by the hologram is recorded again on the copy hologram. In the work, a protective label containing a random diffuse relief area is experimentally implemented. Holographic copying of the area is not possible because it is not a hologram. The area of random relief is almost unique, which allows it to be used as a protective element. To identify the authenticity of the security label, speckle patterns formed by replicas were recorded both from the same and from another area of a random relief. Then their cross-correlation was calculated. It is assumed that the proposed security labels can be produced on standard equipment for replicating security holograms.

Keywords: Security label, Authenticity identification, Random relief, Speckle, Correlation.

Эффекты визуальной динамики на металле: защитные голограммы на основе ЛИППС

М. К. Москвин, Е. В. Прокофьев, Д. Д. Учанова, Д. А. Синев, Г. В. Одинцова, В. П. Вейко
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассматриваются особенности и возможности прямого метода записи защитных голограмм на основе формирования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) на металлических поверхностях. Метод предоставляет возможности создания как высокорегулярных, так и сложных иерархических структур. Метод основан на динамическом изменении поляризации лазерного излучения, что позволяет создавать разнообразные визуальные и структурные признаки. В работе рассматриваются физически неклонируемые иерархические структуры на основе ЛИППС, динамические визуальные эффекты, включая псевдодвижения цвета и изображения (кинеграммный эффект), а также эффект переключения изображения и стереоизображения (эффект объема).

Ключевые слова: Радужная голограмма, Лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС), Неклонируемые метки, Иерархические структуры.

Цитирование: **Москвин, М. К.** Эффекты визуальной динамики на металле: защитные голограммы на основе ЛИППС / М. К. Москвин, Е. В. Прокофьев, Д. Д. Учанова, Д. А. Синев, Г. В. Одинцова, В. П. Вейко // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 204–206.

В основе реализации метода записи защитных голограмм лежит дифракция белого света на матрице ЛИППС с различными пространственными направлениями. В работе представлен новый метод, который позволяет достичь управления ориентацией ЛИППС путем согласованного динамического изменения направления и типа поляризации с траекторией сканирования лазерного пучка. Согласованное изменение параметров позволяет формировать сложные конфигурации дифракционных решёток. Предлагаемый метод формирования дифракционных решеток основан на всесторонне апробированном механизме формирования ЛИППС, основанного на возбуждении ПЭВ для частного случая длинных импульсов, а именно наносекундной длительности [1,2,3,4]. В таком случае полученные структуры можно охарактеризовать как периодом сравнимые с длиной волны воздействующего излучения λ .

Запись структур производилась при помощи волоконного наносекундного лазера (IPG-Photonics) с максимальной средней мощностью 20 Вт и длиной волны 1064 нм, частотой повторения импульсов от 20 до 99 кГц. Плотность мощности выбиралась таким образом, чтобы формирование структур происходило до порогов испарения обрабатываемых материалов. Для селекции линейной поляризации лазерного излучения после коллимирующей системы установлена призма Глана-Тейлора. Перемещение по полю обработки X/Y осуществлялось с помощью гальванометрической сканирующей системы,

после которой пучок фокусировался объективом плоского поля с фокусным расстоянием 216 мм. Диаметр сфокусированного пучка составлял 50 мкм на уровне $1/e^2$.

В результате за счет согласованного изменения направления и типа поляризации лазерного излучения с траекторией сканирования в защитных голограммах были реализованы структурные и визуальные признаки. Структурными признаками являются пространственная ориентация и регулярность ЛИППС, зависящие от поляризации лазерного излучения. При круговой поляризации были сформированы иерархические структуры, которые могут выступать как физически неклонированные элементы и предоставляют перспективы для создания уникальных защитных маркировок. На рисунке 1 показаны микрофотографии регулярных и иерархических ЛИППС.

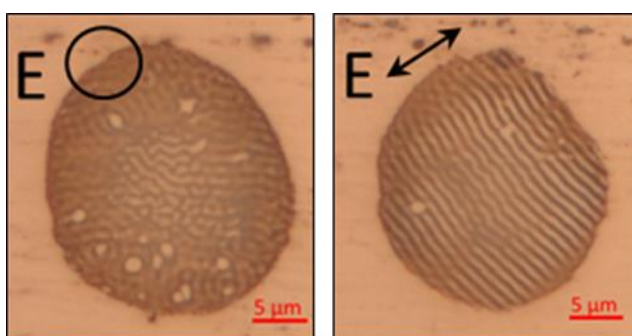


Рис. 1. Микрофотографии ЛИППС на стали 08X18N10: а) иерархический тип; б) регулярный тип

Визуальные признаки включают динамические эффекты такие как псевдодвижения цвета и изображения (кинеграммный эффект), эффект переключения изображения и эффект объема. На рисунке 2 представлена защитная голограмма на поверхности нержавеющей 08X18N10 стали, с эффектом переключения изображения.



Рис. 2. Микрофотографии ЛИППС на стали 08X18N10: а) иерархический тип; б) регулярный тип

Благодарность

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030».

Список источников

- [1] Akhmanov S. A. et al. Interaction of powerful laser radiation with the surfaces of semiconductors and metals: nonlinear optical effects and nonlinear optical diagnostics //Soviet Physics Uspekhi. – 1985. – Т. 28. – №. 12. – С. 1084.

- [2] Bonse J., Gräf S. Maxwell meets Marangoni—A review of theories on laser-induced periodic surface structures //Laser & Photonics Reviews. – 2020. – T. 14. – N^o. 10. – C. 2000215.
- [3] Ionin A. A. et al. Femtosecond laser color marking of metal and semiconductor surfaces //Applied Physics A. – 2012. – T. 107. – C. 301-305. [4] Ivanov A. Composition of scientific book / A. Ivanov, V. Petrov, D. Sidorov. — Moscow: Publisher, 2017. — 321 p.
- [4] Teubner U. et al. Ripple formation with intense Gaussian femtosecond laser pulses close to the damage threshold //Journal of Physics Communications. – 2022. – T. 6. – N^o. 11. – C. 115003.

Effects of visual dynamics on metal surface: security holograms based on LIPSS

M. K. Moskvin, E. V. Prokofiev, D. D. Uchanova, D. A. Sinev, G. V. Odintsova, V. P. Veiko
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

In this work the features and possibilities of the direct method of recording protective holograms based on the formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on metal surfaces are considered. This method provides opportunities to create both highly regular and complex hierarchical structures. This method is based on dynamic modulation in the polarization of laser radiation, which allows the creation of a variety of visual and structural features. In this work we consider physically unclonable hierarchical structures based on LIPSS, dynamic visual effects including movements of colour and image (kinegram effect), as well as the image switching and stereoscopic effects (illusion of depth in an image).

Keywords: Rainbow hologram, Laser-induced periodic surface structures (LIPSS), Non-cloneable labels, Hierarchical structures.

Современные визуальные элементы в защитной полиграфии: переход от рельефно-фазовой голограммы к инновационным комбинированным оптическим защитным элементам

Д. Б. Чекунин¹, А. В. Смирнов²

¹ Научно-исследовательский институт - филиал АО «Гознак», Москва, Россия

² АО НПО «КРИПТЕН», Дубна, Россия

Общие мировые тенденции развития голографических защитных элементов Современный вектор развития оптических защитных элементов и их комбинаторика в новых защитных элементах от «голограммы» к сложным комбинированным оптическим защитным элементам Перспективы развития визуальных признаков защищенной полиграфии и программно-аппаратного обеспечения

Ключевые слова: Защитная голография, Комбинирование интерференционных и дифракционных элементов, Композитная голограмма.

Цитирование: Чекунин, Д. Б. Современные визуальные элементы в защитной полиграфии: переход от рельефно-фазовой голограммы к инновационным комбинированным оптическим защитным элементам / Д. Б. Чекунин, А. В. Смирнов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 207–211.

Рельефно-фазовые или «плоские» голограммы были одним из первых оптическим визуальным элементом, который использовался для защиты от подделок и фальсификации. Они были созданы в конце 1960-х годов и представляли собой в основном простые изображения типа 2-D, которые были нанесены на поверхность продукта. Освоение массового тиражирования таких голограмм было начато в конце 70-х, начале 80-х годов. Также следует отметить, что развитие технологии рельефно-фазовой голограммы тесно связано с развитием технологий и оборудования для производства микроэлектронных компонентов.

Известно, что при изготовлении подделок пытаются обойти традиционные уровни защиты, используя компоненты, имитирующие только внешне элементы изделия, но не повторяющие их полностью. Для борьбы с этим производители используют различные методы, в том числе использование уникальные материалы и технологии производства. Это технологическая защита, смысл которой заключается в искусственном ограничении распространённости определённых технологий и/или высокой их стоимости при тиражировании либо повышенной сложности производства. Поэтому создание сложных микрооптических элементов и совмещение их с идентификационной информацией, воспроизводимой на устройствах считывания, обеспечивает подлинность продукта и надежную защиту от подделки.

Мировым экспертным сообществом признано, что из всего комплекса современных элементов защиты от подделки, основными для обеспечения высокого уровня защиты являются следующие элементы:

- субстрат изделия – его полимерная основа;
- включения в субстрат изделия (волокна и/или пигменты);
- локальные разнотолщинности субстрата, так называемый «водяной знак»;
- микрооптические защитные элементы, размещаемые как в теле субстрата (защитные нити), так и наносимые на поверхность изделия (патчи).

Так же, следуя результатам анализа специальных периодических изданий, таких как «Banknote Technology Report», становится очевидно, что все мировые производители решений для рынка защищённой продукции делают акцент на оптических защитных элементах. Тем самым подтверждается факт главенствующей роли микрооптических признаков в комплексе защитных элементов изделия от подделки, где рельефно-фазовые голограммы являются наиболее распространённым решением. Также следует отметить, что всё большее количество производителей внедряют микрооптические признаки, интегрированные с цифровыми решениями, где оптический элемент - это ключ к цифровой системе.

В настоящий момент в мире для получения визуальных защитных оптических элементов производителями используют не только дифракционные оптические схемы, но все известные оптические элементы в микроскопическом исполнении. Известны защитные решения, построенные на сферических линзах, линзулярных линзах, линзах Френеля, массивах микропризм (как регулярных, так и стохастических), зеркалах полного отражения, полупрозрачных зеркалах, рефлекторах, фильтрах, поляризаторах и волноводах. Все эти микроэлементы чаще всего получают методом эмбоссирования полимерных слоёв.

Как было упомянуто выше, ранее наиболее распространённым элементом для получения защитных признаков являлась эмбоссированная в полимере дифракционная решётка, так называемая «голограмма-дифрактограмма». Связано это с тем, что получение высококачественных периодических рельефов достаточно отработанная технология. Но в последнее время дифракционные элементы уступают своё лидерство призмам и микролинзам, а также их сочетаниям. Это связано с большей цветовой селекцией таких элементов, что позволяет получать цветоизменяемые элементы, невозможные к получению на дифракционных решётках. Т.е. чисто дифракционные элементы уступают место интерференционным признакам или иногда сочетанию явлений интерференции с дифракцией в одном элементе. Большинство современных оптических элементов сочетают различные технологии изготовления и представляют из себя составные комплексы, что делает их еще более сложными для подделки, обеспечивает более высокую степень защиты изделий от фальсификации.

С развитием технологий и повышением потребностей в более сложных и надежных системах защиты рынок требует новых признаков для борьбы с подделками. Это привело к

тому, что сейчас самым востребованным решением в новых исследованиях стало обязательное совмещение признаков интерференционных и дифракционных в одном элементе (графическом поле). Такие элементы меняют свой цвет или кажущуюся форму при изменении угла зрения, что делает их невоспроизводимыми в целом или частично. Условно такие элементы можно разделить на три группы:

1) Мультихромные элементы – изменяют цвет в зависимости от угла обзора и/или освещения. Сочетание различных цветов и хроматических эффектов делает его очень сложным для подделки.

2) Дифракционный гратин – использует интерференцию света для создания сложной трехмерной геометрии (квазиобъёма) и/или плоских изображений. Он может также содержать логотипы, буквы или цифры.

3) Фотоник-кристалл – это элемент, который использует собственную кристаллическую структуру для управления определенными свойствами света (например, флуоресценцию или цветосинтез).

Несмотря на смещение акцентов в сторону интерференционных признаков, в мире ведутся разработки оптических схем, направленные на совершенствование как процесса записи голограммы, так и процесса передачи рельефа на полимерную подложку.

Одним из путей развития традиционной рельефно-фазовой голограммы можно считать получение так называемых «композиционных голограмм»: смешанных по длинам волн, по технологиям изготовления или расположенных на разных физических уровнях носителя.

Самыми передовыми разработками для защитной микрооптики, причём как для рельефно-фазовой, так и для объёмной голографии, является развитие направления записи голограмм не когерентными лазерными пучками, а пучками типа «винт архимеда» или «вилка».

Для получения перспективных голографических элементов объёмного типа разрабатываются новые светочувствительные материалы не только на основе принципов фотополимеризации, но и стабилизирующиеся иными способами фиксации полимерной структуры.

Повышение сложности расчёта голограммы является также одним из путей совершенствования голограммы как объекта защиты от подделки. Вычислительная сложность расчёта голограмм возрастает со сложностью 3D-объектов и разрешением голограммы, это позволяет увеличить основной визуальный параметр кажущегося восстановленного изображения – глубину сцены. Цифровая голография требует дифракционных расчетов для получения комплексной амплитуды света объекта, с последующей коррекцией aberrаций оптической системы и, при необходимости, разверткой фазы. Кроме того, может потребоваться автофокусировка с использованием прогнозирования положения объекта. Эти вычисления отнимают много машинного времени и требуют высокопроизводительного современного программно-аппаратного комплекса.

Современный уровень развития голографической индустрии позволяет производителю голографической продукции иметь три настольных (исключая сам эмбоссер) относительно недорогих устройства достаточных для производства высококачественных рельефно-фазовых голограмм промышленным способом.

В настоящее время для расчёта голограмм достаточно иметь профессиональную графическую станцию с соответствующим программным обеспечением. При этом нет необходимости в огромных вычислительных мощностях (суперкомпьютерах) и обученной высококвалифицированной команде для обслуживания такой системы.

Вывод на физический носитель рассчитанной цифровой голограммы обеспечивается на мастер-матрицу из металла или альтернативного материала (например, кремния) с помощью лазерного нанолитографа. Нет необходимости в литографе и всех сопутствующих расходах, связанных с ним.

Рекомбинация для выполнения эмбоссирования с вала выполняется по технологии УФ-рекомбинации. Используя такое оборудование и соответствующие материалы голографический рельеф для УФ-рекомбинации можно снимать прямо с мастера. А если используется УФ прокаточная машина, то гальванопластика вообще исчезает из технологической цепочки.

Данная технологическая схема в ближайшее время станет общедоступной для производителей упаковочной или иной полиграфической продукции. Это позволит интегрировать защитные голографические рельефы прямо в дизайн или использовать их как элементы дизайна упаковки, что приведёт к взрывному росту производителей имеющих доступ к данной технологии, а следовательно рельефно-фазовая голограмма престанет нести функцию самой распространённой защиты от подделки. Безусловно от неё не откажутся совсем, по-видимому, в ближайшей перспективе она будет выполнять роль второстепенного защитного элемента, например в виде (ФГТ) на изделиях, несущих на себе более продвинутые по технологии оптические защитные элементы.

Анализ исследований и патентов показывает, что все производители защищённой продукции вкладывают средства в разработку новых элементов именно не дифракционного характера. Но также существует мнение, что некоторые из производителей просто вынуждены работать на опережение в рамках острой конкурентной борьбы не только с поддельщиками, но и с коллегами по рынку защищённой продукции, в направлении комбинированных (композитных) элементов, так как в развитии дифракционных структур достигнут технологический предел.

Инновационные комбинированные визуальные элементы в защитной полиграфии становятся более высокоточными и наукоёмкими, а следовательно, надёжными. Это позволяет бороться с подделками и сохранять доверие к физическому носителю в виде документа или банкноты, которые, несмотря на повышенные темпы цифровизации, будут востребованы ещё долгое время.

Modern visual elements in protective printing: transition from relief-phase hologram to innovative combined optical protective elements

D. B. Chekunin¹, A. V. Smirnov²

¹ Research institute - branch office of the Joint Stock Company "Goznak", Moscow, Russia

² JSC RPC KRYPTEN, Dubna, Russia

General global trends in the development of holographic protective elements Modern vector of development of optical protective elements and their combinatorics in new protective elements From a "hologram" to complex combined optical protective elements Perspectives for the development of visual signs of protected printing and hardware and software

Keywords: Protective holography, Combination of interference and diffraction elements, Composite hologram.

Сохранение и трансляция исторического и духовного наследия средствами голографии

Л. Н. Танина

ООО «Магия света», Минск, Беларусь

Открытый в середине XX века метод голографии позволяет получать реалистичные оптические образы трехмерных объектов. Одно из применений голографии, развиваемое ООО «Магия света», это сохранение и преумножение исторических, духовных, религиозных раритетов. Работы ООО «Магия света» делают уникальные реликвии доступным достоянием для широких слоёв населения, тем самым являясь синергетическим аспектом современной культуры.

Ключевые слова: Голография, Наука, Православие, Культура, Лазеры, Христианство.

Цитирование: **Танина, Л. Н.** Сохранение и трансляция исторического и духовного наследия средствами голографии / Л. Н. Танина // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 212–217.

В первой половине XX века советские ученые внесли весомый вклад в развитие такого явления культуры, как голография. В 1959 году Юрий Николаевич Денисюк открыл метод регистрации голограммы в трехмерных средах [1-3]. Среди голографистов-новаторов необходимо назвать таких белорусских ученых, как Борис Иванович Степанов, Александр Сергеевич Рубанов, Леонид Викторович Танин. При их активном участии с 1970-х по 1990-е гг. был организован ряд выставок-демонстраций в разных странах мира, в том числе в Австрии 1981г., Италии 1982 г., Югославии 1983 г., Великобритании 1988 г., и т.д. [4].

Под руководством доктора физико-математических наук Л. В. Танина ученые С. Н. Гинак, В. В. Маникало определили перечень уникальных артефактов культуры, которые с помощью голографии следовало бы сделать доступными массовой аудитории

В 1990-х годах, когда в обществе были ослаблены духовные ориентиры, начал возрождаться интерес к религии. Выражалось это в прямо противоположных тенденциях: с одной стороны, начали оживать православные традиции, возросло стремление к познанию христианских воззрений и атрибутов, а с другой стороны, многие предметы зачастую очень ценные и раритетные стали предметами торга и исчезли в закрытых коллекциях, в том числе за пределами Беларуси. Многие безвозвратно повредились от плохих условий хранения или просто потерялись в наступившей неразберихе. Именно тогда в ООО «Магия света» под руководством Л. В. Танина начались работы по сохранению образов христианских святынь методами голографии. Были налажены контакты с Ветковским музеем старообрядчества и белорусских традиций имени Ф. Г. Шклярова, Витебским областным краеведческим музеем, музеем «Спасённые художественные ценности», Национальным художественным и Национальным историческим музеем Республики Беларусь. Так было положено начало созданию коллекции голограмм православного направления.

Голография – «полная запись» - позволяет не только сохранить объемный визуальный образ объекта с высочайшей точностью, недоступной фотографии и другим средствам записи изображений, но и «запомнить» его энергетику, которая воспринимается при наблюдении голографического изображения. Тема Света в христианстве занимает особое место, ибо в своем Первом Послании Св. апостол Иоанн пишет: «...БОГ ЕСТЬ СВЕТ...». Голограмма – стеклянная пластинка, за которой находился при съемке объект – сохраняет СВЕТ, исходящий от него, а это особенно важно, если объект религиозный.

Большое количество объектов являются не только святыми для верующих, но представляют собой исторические и художественные ценности мирового масштаба, однако они разбросаны по всем странам, а зачастую доступ к ним ограничен. Особенно это относится к мужским монастырям на горе АФОН в Греции, куда закрыт вход прекрасной половине человечества.

С 17 по 24 января 2014 года в Минске по благословию Святейшего Патриарха Московского и всея Руси Кирилла находилась общехристианская реликвия – Честные Дары волхвов. До этого она побывала в Москве, Санкт-Петербурге, а также в Киеве. Более того, реликвия впервые за 500 лет покинула территорию Греции.

Честные Дары волхвов – главная святыня монастыря святого Павла (Святая гора Афон, Греция). История этой святыни связана непосредственно с жизнью Господа Иисуса Христа.

В голографической лаборатории ООО «Магия света» Дары волхвов тоже побывали. На Рис. 1 представлены восстановленные голограммой объекты объемного изображения «Дары волхвов»: золота, ладана и смирны. Сегодня, благодаря голографическим технологиям, христианскую святыню могут лицезреть все белорусы.

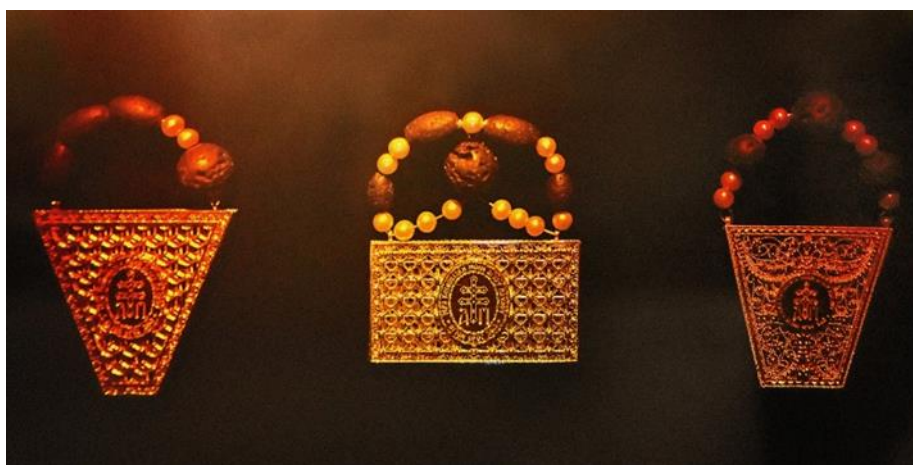


Рис. 1. Восстановленное изображение голограммы «Дары волхвов»

Работа по записи голограмм религиозных объектов Беларуси, доступ к которым был ограничен, началась еще в 1979 году. За более чем 30-летнюю историю работы компании удалось собрать коллекцию голограмм, поистине святых для Беларуси объектов более 60 икон: Купятицкая икона Божией Матери, Спас Пантократор, Святой Николай Чудотворец и многие другие. Первоначально служители церкви достаточно скептически относились к

голографическим образам, но к 2010 году количество записанных голограмм религиозных объектов и раритетов перешло в качественно новое восприятие воссоздаваемых голограммой образов.

Одной из значимых дат для научно-производственного предприятия стало 23 октября 2008 года: в рамках празднования 1020-летия Крещения Руси в лабораторию были доставлены национальные святыни – Крест Преподобной Евфросинии княжны Полоцкой и Жировичская Икона Божией Матери (Рис. 2). Обе святыни имели печальные страницы в своей истории: оригинальный Крест Преподобной Евфросинии княжны Полоцкой исчез в огне Великой Отечественной войны, а Жировичская икона Божией матери пострадала в огне обычного пожара. Создание их голографических образов – такое решение само напрашивалось, чтобы сохранить эти реликвии в случае каких-либо несчастий. С благословления Белорусской Православной церкви Таниным Л.В. и Гинаком С.Н. были записаны голограммы этих святынь [5].



Рис. 2. Внешний вид голограмм «Крест Преподобной Евфросинии княжны Полоцкой (слева) и «Жировичская икона Божией Матери» (справа)

Оптическая копия Креста Преподобной Евфросинии княжны Полоцкой была вручена в честь празднования 1020-летия Крещения Руси его Святейшему Патриарху Московскому и всея Руси Алексию II. Высокопреподобным протоиереем отцом Федором Повным была организована встреча, на которой его Святейшество Алексий II благословил коллектив ООО «Магия света» на дальнейшие работы в области использования голографии для духовного возрождения нации (Рис. 3).



Рис. 3. Его Святейшество Патриарх Московский и всея Руси Алексий II благословляет коллектив ООО «Магия света» на дальнейшие работы в области использования голографии для сохранения сокровищ православия

Энергетика голографических образов оказалась такой, что с благословения митрополита Минского и Слуцкого, Патриаршего Экзарха всея Беларуси Филарета, Крест Преподобной Евфросинии княжны Полоцкой был передан в Храм Покрова Пресвятой Богородицы в Минске (Рис. 4) и является предметом поклонения наравне с писаными классическими иконами.



Рис. 4. Храм Покрова Пресвятой Богородицы, где находятся художественные голограммы – Жировичская Икона Божией Матери, справа – Крест Преподобной Евфросинии княжны Полоцкой

Голограммы вскоре вышли на международный уровень. Оптическая копия Креста Преподобной Евфросинии княжны Полоцкой была вручена Президентом Республики Беларусь Александром Григорьевичем Лукашенко во время его визита в Сербию Патриарху

Сербскому Иринею в 2014 г., в 2016 г. Жировичская Икона Божией Матери была вручена Папе Римскому Франциску во время визита в Ватикан (Рис. 5).



Рис. 5. Президент Республики Беларусь Александр Григорьевич Лукашенко и Папа Римский Франциск во время встречи в Ватикане, 21 мая 2016 года.

Оптическая копия Жировичской Иконы Божией Матери была вручена его Высокопреосвященству Митрополиту Минскому и Заславскому Павлу, Патриаршему Экзарху всея Беларуси в 2017 г.

В 2020 году воссозданный Крест Туровский был передан ООО «Магия света» для создания его голографического образа. Этот жест является еще одним фактом признания голографии со стороны Церкви. Оригинальный Крест был утерян еще в XIII веке во время землетрясения, разрушившего собор.

Голограмма Жировичской Иконы Божьей Матери в 2018 г. Международной ассоциацией производителей голограмм ИНМА (Лондон, Великобритания) удостоена признания как «Лучшая художественная голограмма или инновационный метод применения голографии за - синтез духовности и науки, использование голографии как средства сохранения и преумножения визуальных образов духовных святых, культурного и исторического наследия, признанного православной церковью».

Голограммы православной тематики широко представлялись на многочисленных выставках, использовались и продолжают использоваться на различных религиозных и культурных мероприятиях (дни славянской письменности и культуры, научные конгрессы, дни культуры Беларуси). На фоне голограммы Жировичской Божьей Матери проходят телевизионные проповеди протоиерея Федора Повного.

Следует также отметить Международный проект «Сохранение православных святых с помощью голографии» с участием ученых в области голографии с Беларуси, России, Украины,

Болгарии, Греции, выполняемый под руководством доктора физико-математических наук Л. В. Танина.

В данной статье мы коснулись только одного аспекта роли голографии в современной культуре. За пределами рассмотрения остались интеграция голографии в массовую (шоу, реклама и т.д.), техногенную культуру, образовательный процесс. Но уже очевидно, что голография, не имеющая на первых этапах никакого прикладного значения, стала неотъемлемой частью современной материальной и духовной культуры. В частности, позволяет не только сохранить духовные и культурные ценности православия, но и делает доступными их для широких слоев населения, являясь эффективным носителем его концептов.

Таким образом из всего сказанного можно сделать вывод, что голография является мощным, всеобъемлющим, эффективным средством передачи молодому поколению культурного и духовного наследия белорусской нации, что воспитает у него любовь к Родине и родному краю.

Список источников

- [1] Ю. Н. Денисюк, Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения / Ю.Н. Денисюк. – ДАН СССР, 144, 1275, 1962 г.
- [2] Ю. Н. Денисюк, Оптика и спектроскопия 15, 522 / Ю.Н. Денисюк – АН СССР, Москва, 1963 г.
- [3] Ю. Н. Денисюк, Оптика и спектроскопия 18, 275 / Ю.Н. Денисюк – АН СССР, Москва, 1965 г.
- [4] Н. Г. Орлова, А. С. Рубанов, Л. В. Танин. «Выставка «Голография-78». Журнал прикладной спектроскопии, выпуск 6. 1978 г.
- [5] Диалог науки и религии: создание уникальной голограммы «Крест Преподобной Евфросинии княжны Полоцкой» // Научно-популярный журнал «Экспорт и импорт». – 2008. – №1-2(28). – С. 88-90. / под редакцией Л. Н. Таниной.

Preservation and broadcast of historical and spiritual heritage by means of holography

L. N. Tanina

Lightmagic Ltd., Minsk, Belarus

Discovered in the middle of XX century the method of holography allows obtaining realistic optical images of three-dimensional objects. One of the applications of holography developed by Lightmagic Ltd. is the preservation and multiplication of historical, spiritual and religious rarities. The works of Lightmagic Ltd. make unique relics available to the general public, thus being the synergetic aspect of contemporary culture.

Keywords: Holography, Science, Orthodoxy, Culture, Lasers, Christianity.

Магнитооптические методы защиты документов и защитных голограмм ферромагнитными частицами

А. С. Кузнецов, М. В. Волкова

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Для защиты документов и защитных голограмм в работе предложен защитный элемент на основе использования ферромагнитных частиц в его составе. Проверка подлинности документов и защитных голограмм на наличие элемента защиты в виде ферромагнитных частиц осуществляется магнитооптическими визуализаторам, в частности «Регула 4197».

Ключевые слова: Защитная голограмма, Магнитооптика, Магнитооптический эффект Фарадея, Защита документов.

Цитирование: Кузнецов, А. С. Магнитооптические методы защиты документов и защитных голограмм ферромагнитными частицами / А. С. Кузнецов, М. В. Волкова // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 218–219.

В настоящее время для изделий, таких как ценные бумаги, банкноты, паспорта, пластиковые ID документы и другие материальные объекты, для ограничений их фальсификации активно используются защитные элементы [1]. Среди всего разнообразия существующих элементов защиты, можно выделить использование ферромагнитных частиц для защиты ценных документов.

В работе [2] авторами предлагается использование в качестве защитных элементов для ценных документов магнитоактивного агента в виде магнитомягких волокон, частиц магнитного порошка, магнитных чернил с низкой коэрцитивной силой. Недостатком предложенного метода проверки на подлинность ценного документы является часто возникающие ошибки при синхронизации информации, снимаемой с магнитоиндукционных датчиков и датчиков оптической сканирующей системы. Для устранения данного недостатка, а также повышения защищенности изделий, в том числе и голограмм, в работе предлагается новый способ защиты, который заключается в формировании скрытого микроструктурного образования [3].

При этом скрытое магнитное микроструктурное образование может состоять как из магнитных частиц определенного материала (магнитомягкого или магнитотвердого), так и из их комбинации (аморфных магнитомягких и магнитотвердых материалов), и при этом может располагаться в приповерхностных слоях защищаемого изделия в хаотичном или регулярном расположении. С помощью магнитооптического визуализатора «Регула 4197» были проведены исследования волокон из аморфных магнитных сплавов Fe-Ni-B и Co-Mn-Si-B, внедренных в слои пластиковых карт. Такие волокна обладают магнитными свойствами, позволяющими обеспечивать их импульсное однородное перемещение в полях менее десятых долей эрстеда. Величины намагниченности в таких волокнах достигают достаточно высоких значений порядка нескольких единиц emu/g , что позволяет получать четко

различные магнитооптические изображения, формируемые локальными магнитными полями рассеяния волокон (рис. 1). Диаметр волокон составлял 8 ...10 мкм, длина 40...100 мкм, что также обеспечивает формирование четко визуализируемых магнитооптических изображений с числом элементов на одном квадратном сантиметре порядка нескольких тысяч, и тем самым повышает точность сравнения микроизображений при проверках подлинности контролируемых объектов.

Таким образом, результаты работы наглядно демонстрируют возможность использования скрытых магнитооптических изображений магнитных микроструктур с хаотичным или регулярным расположением магнитных частиц для формирования защитных элементов для документов и защитных голограмм.

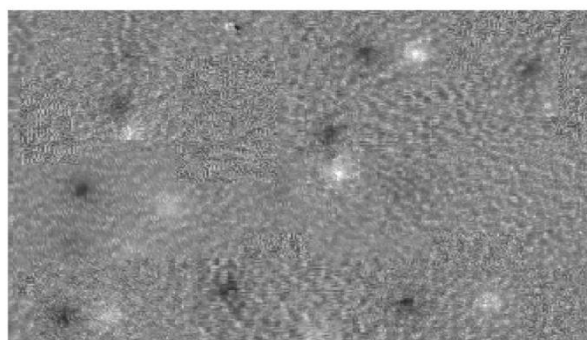


Рис. 1. Магнитооптическое изображение волокон из аморфных магнитных сплавов Fe-Ni-B и Co-Mn-Si-B

Список источников

- [1] **Одинокоев, С. Б.** Методы и оптико-электронные приборы для автоматического контроля подлинности защитных голограмм. М.: Техносфера, 2013. 176 с.
- [2] **Патент № 2 298 603 РФ.** Способ проверки подлинности ценной бумаги / А. Н. Шалыгин. — Оpubл. 10.05.2007.
- [3] **Патент № 2 748 106 РФ.** Защитный элемент на основе скрытых магнитных микроструктурных образований и способ защиты изделий от подделки // А. Н. Шалыгин, А. П. Губарев, К. С. Филюкина [и др.]. — Оpubл. 19.05.2021.

Magneto-optical protection methods of documents and security holograms by ferromagnetic particles

A. S. Kuznetsov, M. V. Volkova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

To protect documents and security holograms, a security element based on ferromagnetic particles in its composition is proposed in the work. Verification of authenticity of documents and security holograms for the presence of a security element in the form of ferromagnetic particles is carried out by magneto-optical visualizers, in particular "Regula 4197".

Keywords: Security hologram, Magneto-optics, Magneto-optical Faraday effect, Document protection.

Подходы к исследованию эванесцентного поля терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов на Новосибирском лазере на свободных электронах

В. Д. Кукотенко¹, В. В. Герасимов^{1,2}

¹ Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

В настоящее время в фотонных интегральных схемах размер схем ограничен дифракцией, что является барьером для дальнейшего развития в сфере оптических коммуникаций. Плазмоника могла бы устранить это несоответствие размеров между электронными и фотонными компонентами. Фотоника и плазмоника могут дополнять друг друга, поскольку при правильных условиях оптические сигналы могут быть преобразованы в поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) и наоборот. Поэтому, в настоящее время активно разрабатываются плазмонные интегральные планарные схемы для устройств беспроводной связи. Переход в ТГц диапазон частот позволит увеличить скорость передачи и обработки данных. При разработке плазмонных интегральных схем важно знать оптические свойства поверхностей. В настоящее время отсутствуют достоверные методы для определения оптических свойств поверхностей. В данной работе будут представлены экспериментальные методы зондирования эванесцентного поля ППП над металлической поверхностью. По измеренной глубине проникновения поля ППП и затуханию энергии ПП, вдоль направления распространения, предложен метод определения эффективной поверхностной диэлектрической проницаемости металла.

Ключевые слова: Оптика, Плазмоника, Терагерцовый диапазон, Поверхностные плазмоны.

Цитирование: Кукотенко, В. Д. Подходы к исследованию эванесцентного поля терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов на Новосибирском лазере на свободных электронах / В. Д. Кукотенко, В. В. Герасимов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 220–225.

Введение

В терагерцовых ППП, распространяющихся вдоль границы раздела проводник-диэлектрик в качестве проводника, может выступать металл, диэлектрик в линии поглощения или допированный полупроводник. По измеряемым характеристикам ППП (длине распространения вдоль границы раздела, фазовой скорости и глубине проникновения поля ППП в диэлектрик) можно восстановить оптические свойства проводника. В отличие от видимого и ИК диапазонов, все благородные металлы имеют высокую проводимость в ТГц диапазоне частот, в результате чего поле ППП в диэлектрике слабо связано с поверхностью и присутствуют большие радиационные потери плазмонов даже на небольших шероховатостях и неоднородностях [1]. Это накладывает определенные трудности для практической

реализации плазмонной рефрактометрии, в частности для измерения эванесцентного поля ППП над поверхностью проводника.

1. Поверхностный плазмон-поляритон

Поверхностный плазмон-поляритон — это комбинация электромагнитной волны и волны свободных зарядов, которые распространяются вдоль границы проводник-диэлектрик. Электромагнитное поле экспоненциально затухает на границе проводник – диэлектрик, и описывается формулой

$$E(z, x) = E_0 \exp\left(-\frac{z}{\delta_d}\right) \exp(ik_{spp}x) \quad (1)$$

где E_0 - амплитуда эванесцентного поля, δ_d - глубина проникновения ППП в воздух (вдоль оси z), k_{spp} - волновое число ППП по оси x , вдоль которой распространяются ППП.

Образцы представляют собой плоскую стеклянную пластинку размером 100×100×11 мм с нанесенным на ее полированную верхнюю грань непрозрачного слоя золота (Au) толщиной 300 нм методом магнетронного распыления. Поверх золота методом электронно-лучевого распыления наносится слой сульфида цинка (ZnS). Толщина слоя ZnS в различных образцах составляла от 0,96 до 1,67 мкм (см. Таблицу 1).

2. Оптическая схема для детектирования ППП методом «экранирования»

Методика эксперимента заключается в том, что регистрируется эванесцентная волна, прошедшая под металлическим экраном. Экран закреплялся на механизированном трансляторе, перемещаемом вдоль оси z , с помощью которого изменялось расстояние z между поверхностью образца и экраном. Часть энергии ППП, которая не проходила под экраном, рассеивалась от его поверхности.

Для измерения эванесцентного поля ППП использовалась установка, изображенная на рисунке 1. Излучение от Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ), проходило систему калибровочных зеркал 1, 2, попадало на цилиндрическое металлическое зеркало с фокусным расстоянием $f = 75$ мм. Пучок фокусировался на ребро торца образца 4. Сфокусированное на ребро образца излучение в следствии дифракции частично преобразовывалось в ППП, которые затем распространялись вдоль поверхности образца. Далее, пучок проходил через вертикальную щель 5 высотой 1 мм, изготовленную из непрозрачного для ТГц излучения поролон, установленную для экранирования от паразитных засветок объемных волн. После образца ППП распространялись по 1/8 цилиндра 6. Цилиндр, изображенный на рисунке 6, был необходим для того, чтобы увеличить соотношение сигнал/шум за счет уменьшения интенсивности радиационных засветок и паразитных объемных волн, которые возникали на входе при дифракции сфокусированного зеркалом 3 излучения на ребре образца, а также в результате радиационных потерь ППП. Эванесцентная волна, прошедшая под экраном, регистрировалась Ячейкой Голея 7.

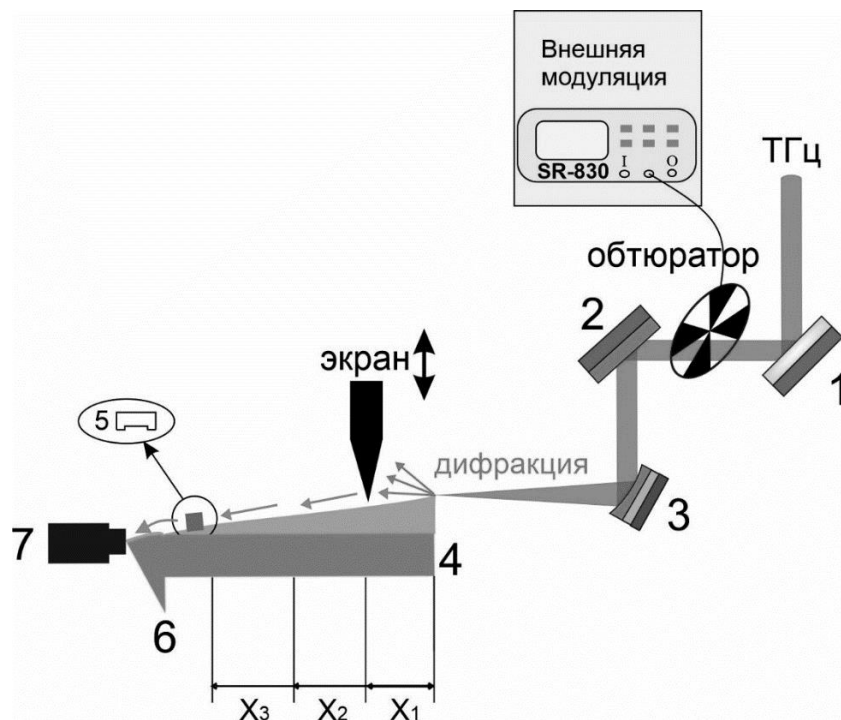


Рис. 1. Установка для детектирования ПП методом «экранирования»

3. Глубина проникновения ППП в зависимости от толщины напыляемого слоя ZnS

Для измерения глубины проникновения ППП использовалась установка, изображенная на рисунке 1. Структура образца представляла из себя слой Au толщиной 300 нм, поверх которого наносился слой ZnS, который имел градиент толщины от 0,96 до 1,67 мкм.

Была получена зависимость полезного сигнала с синхронного детектора от расстояния z между экраном и образцом. Полученные данные представлены в Таблице 1. Аппроксимация проводилась функцией вида

$$y = y_0 + A_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{z - z_0}{D_p}\right) \right] \quad (2)$$

где y_0 – сигнал шума, A_1 – амплитуда, z – расстояния между экраном и образцом, z_0 – начальный уровень аппроксимации, $D_p = \delta_d / 2$ – глубина проникновения поля ППП (по интенсивности).

Таблица 1. Зависимость глубины проникновения ППП от толщины напыляемого слоя ZnS.

Толщина напыляемого слоя ZnS (d), мкм	1,67	1,52	1,33	0,96
Расстояние от края образца (x), мм	17	46	65	84
Глубина проникновения (D_p), мм	0,37±0,01	0,58±0,07	0,72±0,05	0,89±0,06

По результатам аппроксимации для разных толщин ZnS была построена зависимость глубины проникновения D_p от толщины напыляемого слоя ZnS (d) на длине волны $\lambda=197$ мкм, представленная на рисунке 2.

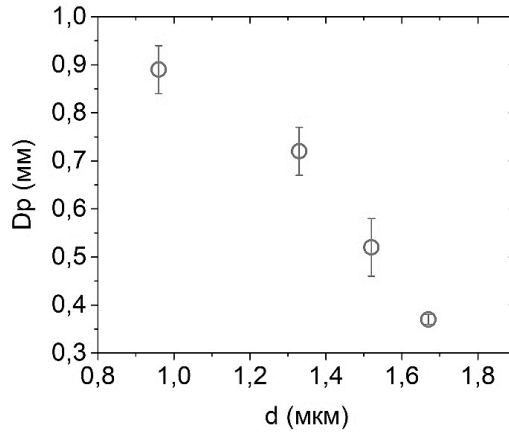


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения ППП от толщины напыляемого слоя ZnS

Из полученного графика видно, что при увеличении толщины напыляемого слоя ZnS (d) глубина проникновения уменьшается, что качественно согласуется с теоретической зависимостью.

4. Определение диэлектрической проницаемости металла

Для определения диэлектрической проницаемости металла необходимы две экспериментальные величины. Первая это глубина проникновения поля ППП (D_{p_exp}) в воздух (по интенсивности), которая была измерена и описана в главе 3. Вторая это комплексный показатель преломления ППП (\tilde{n}_{s_exp}) (по отношению к вакууму), рассчитываемая по формуле (3).

$$\tilde{n}_{s_exp} = n_{s_exp} + ik_{s_exp} \cdot \quad (3)$$

Показатель преломления ППП был измерен с помощью плазмонного интерферометра Майкельсона. Описание прибора и методики измерения можно найти в статье [2].

Аналитическое выражение для нахождения глубины проникновения в модели трехслойной структуры имеет вид

$$D_{p_an} = \frac{1}{2\text{Re}(\zeta)} \quad (4)$$

где ζ - константа затухания поля ППП в воздух, рассчитываемая по формуле (5).

$$\zeta = ik_0\xi \quad (5)$$

где ξ - поверхностный импеданс, рассчитываемый по приближенной формуле, описываемой в статье [3]

$$\xi \approx \frac{i \times \left(\varepsilon_d \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_m^2}{\varepsilon_a + \varepsilon_m}} \times (\varepsilon_a + \varepsilon_m) + k_0 d \cdot \varepsilon_m \times [\varepsilon_a (\varepsilon_m - \varepsilon_d) - \varepsilon_m \varepsilon_d] \right)}{\varepsilon_d \cdot (\varepsilon_a + \varepsilon_m) \times \left[k_0 d \cdot \varepsilon_d \sqrt{\frac{\varepsilon_m^2}{\varepsilon_a + \varepsilon_m}} + \varepsilon_m \right]} \quad (6)$$

где ε_d - диэлектрическая проницаемость диэлектрика, ε_m - диэлектрическая проницаемость металла, ε_a - диэлектрическая проницаемость воздуха (над диэлектриком), k_0 - волновое число объемного излучения в вакууме, d - толщина напыляемого слоя ZnS.

Комплексный показатель преломления в модели трехслойной структуры описывается формулой (7)

$$\tilde{n}_{s_an} = \sqrt{\varepsilon_a - (\varepsilon_a \xi)^2} \quad (7)$$

Взяв экспериментальное значение глубины проникновения и экспериментальную мнимую часть показателя преломления, мы построили поверхность функции ошибки (см. рисунок 3), определяемой выражением:

$$f = \left[\frac{\kappa_{s_exp} - \text{Im}(\tilde{n}_{s_an})}{\kappa_{s_exp}} \right]^2 + \left[\frac{D_{p_an} - D_{p_exp}}{D_{p_exp}} \right]^2 \quad (8)$$

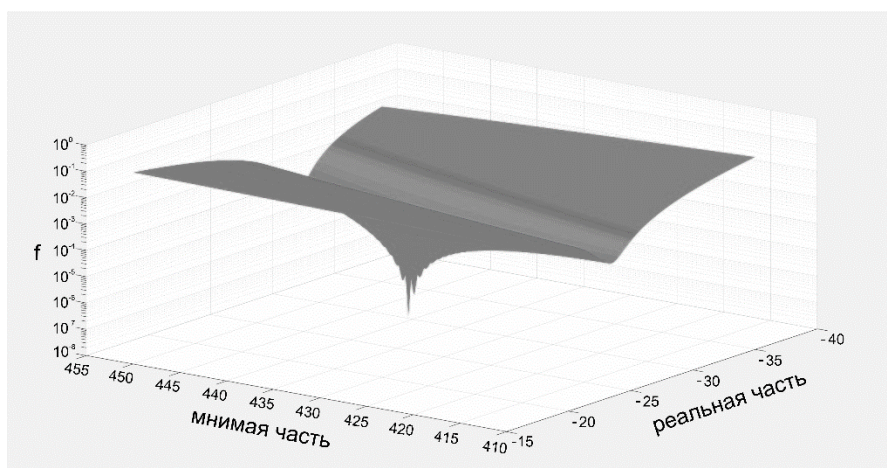


Рис. 3. Рассчитанная поверхность по функции ошибки. Зависимость реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости металла (Au).

В данном случае было получено однозначное решение и найдена эффективная диэлектрическая проницаемость золотой поверхности: $\varepsilon_{Au} = -27 + i \cdot 436$. Значение, рассчитанное по модели Друде ($\varepsilon_{Au} = -110000 + i \cdot 465000$), отличается на несколько порядков, что демонстрирует актуальность данной работы.

Заключение

Предложен и апробирован метод «экранирования» для детектирования затухания поля поверхностных плазмон-поляритонов. Измерены глубины проникновения поля поверхностных плазмонов на структуре «Au-ZnS-воздух» с градиентной толщиной напыления слоя ZnS на длине волны $\lambda = 197$ мкм. Было доказано, что глубина проникновения поля ППП уменьшается с увеличением толщины напыляемого диэлектрического слоя. Найден метод решения обратной задачи нахождения диэлектрической проницаемости металлической поверхности по глубине проникновения и мнимой части показателя преломления ППП, дающий однозначное решение. Данные результаты говорят о

необходимости измерения оптических констант при разработке плазмонных интегральных схем.

Благодарности

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Новосибирский ЛСЭ" в ИЯФ СО РАН. Авторы благодарят ЦКП ВТАН НГУ за проведение измерений на научном оборудовании.

Список источников

- [1] Gerasimov V. V. et al. Growth of terahertz surface plasmon propagation length due to thin-layer dielectric coating //JOSA B. – 2016. – Т. 33. – №. 11. – С. 2196-2203.
- [2] Gerasimov V. V., Nikitin A. K., Lemzyakov A. G. Planar Michelson Interferometer Using Terahertz Surface Plasmons //Instruments and Experimental Techniques. – 2023. – Т. 66. – №. 3. – С. 423-434.

Approaches to the study of the evanescent field of terahertz surface plasmon-polaritons at the Novosibirsk free electron laser

V. D. Kukotenko¹, V. V. Gerasimov^{1,2}

¹ Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia

Currently, photonic integrated circuits are diffraction-limited in size, which is a barrier to further development in optical communications. Plasmonics could eliminate this size mismatch between electronic and photonic components. Photonics and plasmonics can complement each other because, under the right conditions, optical signals can be converted into surface plasmon-polaritons (SPP) and vice versa. Therefore, plasmonic integrated planar circuits for wireless communication devices are currently being actively developed. The transition to the THz frequency range will increase the speed of data transmission and processing. When designing plasmonic integrated circuits, it is important to know the optical properties of surfaces. Currently, there are no reliable methods for determining the optical properties of surfaces. In this paper, we will present experimental methods for probing the evanescent field of the SPP over a metal surface. Based on the measured depth of penetration of the SPP field and the attenuation of the SPP energy along the direction of propagation, a method is proposed for determining the effective surface permittivity of a metal.

Keywords: Optics, Plasmonics, Terahertz range, Surface plasmons.

Стабилизация системы, усиливающей нелинейности при коллинеарном взаимодействии света с бегущей решеткой показателя преломления

В. С. Герасименко^{1,2}, Н. Д. Герасименко²

¹ Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² ООО «СМАРТС-Кванттелесом», Санкт-Петербург, Россия

Ранее было продемонстрировано, что при коллинеарном взаимодействии оптической и СВЧ волн на отрезках порядка одного периода СВЧ волны и меньше в спектре выходного света наблюдаются пики не только первых, но и высших порядков. Для увеличения эффективной протяженности области взаимодействия оптическая система была подключена к волоконному кольцу обратной связи. При этом возникла задача минимизации фазовых разрывов обоих типов волн при прохождении возникшей петли. В случае СВЧ сигнала задача была решена без значительных сложностей. Для оптической же волны выяснилось, что влияние внешних факторов приводит к дрейфу условий резонанса с характерными временами порядка десятков секунд. В данной работе рассматриваются методы уменьшения этого влияния.

Ключевые слова: Бегущие решётки показателя преломления, Фазовая модуляция света, Управление светом, Интегральная оптика.

Цитирование: Герасименко, В. С. Стабилизация системы, усиливающей нелинейности при коллинеарном взаимодействии света с бегущей решеткой показателя преломления / В. С. Герасименко, Н. Д. Герасименко // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 226–228.

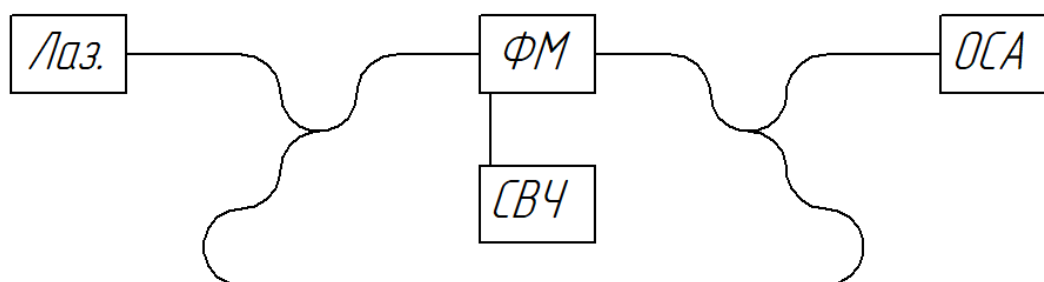
Высокочастотный интегрально-оптический фазовый модулятор представляет собой полосковый световод, размещенный возле СВЧ-волновода — электорда бегущей волны. В случае ниобата лития их взаимное расположение зависит от среза кристалла: Z-срез обеспечивает максимальную эффективность модуляции при нахождении оптического канала под «горячим» электродом копланарной линии, X-срез же — при помещении световода в межэлектродный зазор [1]. При этом следует отметить, что ниобат лития характеризуется линейным электрооптическим эффектом, т. е. бегущая СВЧ волна порождает бегущую решетку показателя преломления с тем же периодом.

При коллинеарном взаимодействии света с бегущей решеткой показателя преломления в описанной схеме происходит, как уже было сказано, фазовая модуляция оптического излучения. Данный процесс сопровождается генерацией боковых частот. При этом с ростом амплитуды показателя преломления бегущей решетки интенсивность переноса энергии с основной частоты в боковые увеличивается, и в некоторый момент в выходном спектре возникают гармоники высших порядков.

Следует отметить, что размеры области взаимодействия света с бегущей решеткой показателя преломления ограничены размерами подложки ниобата лития. С учетом того, что

заготовки интегрально-оптических чипов располагаются обычно не по диагонали подложки, а некоторым квадратным или прямоугольным блоком, состоящим из типовых элементов, и что каждый чип содержит технические области, необходимые для ввода и вывода электромагнитных волн обоих типов, реальная протяженность участка коллинеарного взаимодействия оказывается того же порядка, что и один период СВЧ волны.

Для увеличения эффективной длины области взаимодействия было решено использовать оптоволоконную петлю обратной связи (Рис. 1). Выяснилось, что похожая оптическая система теоретически была рассмотрена достаточно давно, единственным отличием было добавление в петлю обратной связи усилителя [2]. При этом сами авторы отмечали, что усилитель будет вносить свои шумы и искажения в итоговый спектр, но для их задачи (генерации оптических частотных гребенок) это было приемлемо с количественно оцененной точностью. Кроме того, в предложенной модели условия неразрывности фаз волн обоих типов при прохождении петли обратной связи считались достигнутыми сразу. Физического же проведения такого эксперимента ранее найти не удалось [3].



Лаз. — лазерный источник с оптическим изолятором, СВЧ — источник СВЧ волны, порождающей бегущую решетку показателей преломления, ФМ — фазовый модулятор, ОСА — оптический спектроанализатор, Y-делитель и объединитель не подписаны, оптические FC/APC коннекторы опущены.

Рис. 1. Схема системы увеличения

В процессе реального эксперимента получилось достаточно быстро подобрать условие, обеспечивающее отсутствие существенных фазовых разрывов для бегущей решетки показателя преломления, т. е. создать ситуацию, когда за время, пока свет проходит по петле обратной связи от выхода области взаимодействия к ее входу, фаза бегущей СВЧ волны на выходе так же успевает совпасть с фазой на входе. В силу относительно большой длины СВЧ волны тепловые и иные паразитные эффекты, изменяющие оптическую длину волоконного кольца, почти не смещают собственные частоты петли обратной связи. Для достижения аналогичных условий для оптической волны была предпринята попытка использовать фазовый модулятор с дополнительным емкостным электродом, аналогичным тому, который используется в амплитудных модуляторах для управления рабочей точкой [4]. Как показала практика, длина оптической волны в масштабах волоконного кольца настолько мала, что при размещении оптических элементов на открытом столе малейшие колебания температуры воздуха приводят к смещению «резонансных» условий.

С помощью умеренной пассивной теплоизоляции получилось увеличить время стабильности оптической согласованности фаз. От улучшенной пассивной и активной ожидаются еще лучшие результаты.

Список источников

- [1] **Петров В. М.** Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития / В. М. Петров, П. М. Агрузов, В. В. Лебедев, И. В. Ильичев, А. В. Шамрай // Успехи физических наук. – 2021. – Т. 191. – №. 7. – С. 760-780.
- [2] **Но К. Р.** Optical frequency comb generator using phase modulation in amplified circulating loop / К. Р. Но, J. М. Kahn // IEEE Photonics Technology Letters. – 1993. – Vol. 5. – №. 6. – P. 721-725.
- [3] **Петров В. М.** Генерация оптических частотных гармоник для систем квантовых коммуникаций на боковых частотах / В. М. Петров, А. В. Шамрай, И. В. Ильичев, Н. Д. Герасименко, В. С. Герасименко, П. М. Агрузов, В. В. Лебедев // Фотоника. – 2020. – Т. 14. – №. 7. – С. 570-585.
- [4] **Петров В.М.** Отечественные СВЧ интегрально-оптические модуляторы для квантовых коммуникаций / В. М. Петров, А. В. Шамрай, И. В. Ильичев, П. М. Агрузов, В. В. Лебедев, Н. Д. Герасименко, В. С. Герасименко // Фотоника [Photonics Russia] – 2020. – Т. 14. – № 5. – С. 414-423.

Stabilization of a system that enhances nonlinearities in the collinear interaction of light with a refractive index traveling grating

V. S. Gerasimenko^{1,2}, N. D. Gerasimenko²

¹ ITMO University, Saint Petersburg, Russia

² Quanttelecom LLC, Saint Petersburg, Russia

Previously it was demonstrated, that peaks of not only first, but also higher orders are observed in the output light spectrum during collinear interaction of optical and radio frequency waves in an area with length of one microwave wave period or less. To increase the interaction areas effective length, the optical system was connected to a fiber feedback ring. In this case, the phase discontinuities of both types of waves during the passage of the resulting loop must be minimized. The problem was solved without significant difficulties for radio frequency waves. For an optical wave, it turned out that the influence of external factors leads to a drift of resonance conditions with typical times of tens of seconds. This paper discusses methods to reduce this influence.

Keywords: Refractive index traveling gratings, Light phase modulation, Light control, Integrated optics.

Интегральная фотоника на основе анизотропных ван-дер-ваальсовых материалов

А. А. Вишневым, Г. Ермолаев, Д. Грудинин, И. Круглов, А. Арсенин, В. Волков

Emerging Technologies Research Center, XPRANCEO, Дубай, ОАЭ

Ван-дер-ваальсовы материалы, интерес к которым не снижается после получения графена, можно использовать не только в качестве слоев толщиной в один атом. Их объемные кристаллы обладают рекордно высокими показателями преломления и гигантской анизотропией оптических свойств, что потенциально позволит создавать сверхкомпактные интегральные фотонные схемы для оптической обработки информации. Мы показываем, что гигантская анизотропия оптических свойств является значительным преимуществом таких материалов, позволяющим дополнительно уменьшать перекрестные помехи между волноводами. Разнообразие материалов позволяет найти подходящие решения для любого рабочего диапазона в оптической области.

Ключевые слова: Дихалькогениды переходных металлов, Гексагональный нитрид бора, Модовая площадь, Перекрестные помехи, Плотность интеграции.

Цитирование: Вишневым, А. А. Интегральная фотоника на основе анизотропных ван-дер-ваальсовых материалов / А. А. Вишневым, Г. Ермолаев, Д. Грудинин, И. Круглов, А. Арсенин, В. Волков // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 229–231.

С момента изоляции и изучения свойств графена — атомарно тонкого слоя графита, интерес к двумерным материалам находится на очень высоком уровне. Их список постоянно пополняется, однако не только атомарно тонкие пленки этих материалов представляют интерес. Многие объемные кристаллы двумерных материалов обладают уникальными оптическими свойствами, характеризующимися сильным экситонным оптическим откликом в плоскости атомарных слоев и более слабым откликом по нормали к слоям. Это приводит к рекордно высоким значениям показателей преломления среди материалов, прозрачных в том же спектральном интервале, и гигантской оптической анизотропии [1].

Развитие современной интегральной кремниевой фотоники предопределялось не только развитой в микроэлектронике технологией создания кремниевых наноструктур, но и высоким показателем преломления $\sim 3,5$ и прозрачностью в ближнем инфракрасном диапазоне. Благодаря этому создается большой контраст показателей преломления в ядре и обкладке интегрального кремниевого волновода, что позволяет передавать оптические сигналы по волноводам с поперечным сечением субмикронного размера. Тем не менее, размеры волнопроводов все еще остаются значительно выше, чем у электронных компонентов, что ограничивает производительность фотонных интегральных схем.

Такие материалы как дисульфид молибдена и вольфрама, а также диселенид молибдена обладают показателем преломления более 4, что в перспективе может позволить дополнительно уменьшить физический размер волнопроводов. Тем не менее, по нормали к

атомарным плоскостям показатель преломления является не столь высоким. Кроме того, хорошо исследованы волноводы из изотропных материалов, а является ли влияние гигантской оптической анизотропии позитивным или отрицательным пока не известно.

Для определения влияния оптической анизотропии на свойства волноводов были теоретически исследованы волноводы прямоугольного сечения на подложке из SiO_2 . Отметим, что кристаллы ван-дер-ваальсовых материалов совместимы с любыми подложками, в отличие от традиционных полупроводниковых соединений, требующих, чтобы постоянная решетки подложки совпадала с таковой у материала. Изучалась зависимость модовой площади, эффективного показателя преломления и перекрестных помех в зависимости от размеров волновода. Необходимость исследования перекрестных помех связана с тем, что именно они, а не физический размер волновода определяют насколько близко волноводы могут находиться друг к другу в интегральной фотонной схеме, а следовательно, и ее производительность. Также исследовался модовый состав волноводов, поскольку для передачи данных более пригодны одномодовые волноводы. Проведено сравнение характеристик волноводов из анизотропного материала и изотропного с показателем преломления, равным компоненте показателя преломления анизотропного материала в направлении атомарных плоскостей.

В ходе исследования было установлено, что параметры волноводов, при которых достигается минимальная модовая площадь, не являются оптимальными для минимизации перекрестных помех. При этом, для перекрестные помехи тем слабее, чем выше эффективный показатель преломления волноводной моды. Для получения большего эффективного показателя преломления физический размер ядра волновода стоит делать больше, откуда следует, что волноводы с большим размером ядра можно плотнее располагать на поверхности чипа. Размер же ядра ограничен требованием на одномодовость волновода. Анизотропия оптических свойств практически не влияет на фундаментальную волноводную моду, поскольку в ней электрическое поле ориентировано вдоль атомарных плоскостей, однако существенно уменьшает эффективный показатель преломления мод более высокого порядка. Таким образом, за счет анизотропии можно поддерживать одномодовый режим в более крупных волноводах, за счет чего достичь более высокого эффективного показателя преломления. Особый интерес представляет использование hBN в ультрафиолетовой области спектра, где материал является прозрачным, оптически анизотропным и обладает максимальным показателем преломления. Более подробно результаты работы изложены в публикациях [2,3].

Список источников

- [1] **Ermolaev, G. A.** Giant optical anisotropy in transition metal dichalcogenides for next-generation photonics. / G. A. Ermolaev, D. V. Grudin, Y. V. Stebunov, K. V. Voronin, V. G. Kravets, J. Duan, A. B. Mazitov, G. I. Tselikov, A. Bylinkin, D. I. Yakubovsky, S. M. Novikov, D. G. Baranov, A. Y. Nikitin, I. A. Kruglov, T. Shegai, P. Alonso-González, A. N. Grigorenko, A. V. Arsenin, K. S. Novoselov, V. S. Volkov // Nature Communications. — 2021. — Vol. 12. — P. 854.

- [2] **Vyshnevyy, A. A.** A hidden advantage of van der Waals materials for overcoming limitations in photonic integrated circuitry / A. A. Vyshnevyy, G. A. Ermolaev, D. V. Grudin, K. V. Voronin, I. Kharichkin, A. Mazitov, I. A. Kruglov, D. I. Yakubovsky, P. Mishra, R. V. Kirtaev, A. V. Arsenin, K. S. Novoselov, L. Martin-Moreno, V. S. Volkov // arxiv:2304.00131 — 2023.
- [3] **Grudin, D. V.** Hexagonal boron nitride nanophotonics: a record-breaking material for the ultraviolet and visible spectral ranges / D. V. Grudin, G. A. Ermolaev, D. G. Baranov, A. N. Toksumakov, K. V. Voronin, A. S. Slavich, A. A. Vyshnevyy, A. B. Mazitov, I. A. Kruglov, D. A. Ghazaryan, A. V. Arsenin, K. S. Novoselov, V. S. Volkov // Materials Horizons. — 2023. — Vol. 10. — P. 2427–2435.

Integrated photonics based on anisotropic van der Waals materials

A. A. Vyshnevyy, G. Ermolaev, D. Grudin, I. Kruglov, A. Arsenin, V. Volkov

Emerging Technologies Research Center, XPANCEO, Dubai, UAE

Van der Waals materials, the interest in which has not diminished since graphene was obtained, can be used not only as one-atom-thick layers. Their bulk crystals have record-high refractive indices and giant anisotropy of optical properties, which will potentially enable ultra-compact integrated photonic circuits for optical information processing. We show that the giant anisotropy of optical properties is a significant advantage of such materials, further reducing crosstalk between waveguides. The variety of materials makes it possible to find suitable solutions for any operating range in the optical domain.

Keywords: Transition metal dichalcogenides, Hexagonal boron nitride, Mode area, Crosstalk, Integration density.

Моделирование открытого телескопа Кассегрена для задач современной оптической связи

А. А. Шустова¹, С. Г. Алексеев^{1,2,3}

¹ АО SR Space, Москва, Россия

² ООО «Геофотоника», Санкт-Петербург, Россия

³ АО «ГК Динамика», Москва, Россия

Стремительное развитие оптических систем дистанционного зондирования Земли и открытых каналов связи требует эффективных телескопических систем. Наиболее перспективной и надежной схемой (относительно массо-габарита) является открытый телескоп Кассегрена. В докладе представлен численный (модельный) поиск оптимальных комбинаций критических параметров подобных телескопов, отвечающих конкретным запросам современной индустрии. Новизна разработки заключается в обладании оптической системы высокой светосилой за счет максимизации апертуры посредством отсутствия в ней первой линзы, а также вынесения за пределы корпуса одного из зеркал.

Ключевые слова: Телескоп Кассегрена, Лазерная связь, Открытый телескоп, Дистанционное зондирование Земли, Спутниковая связь.

Цитирование: Шустова, А. А. Моделирование открытого телескопа Кассегрена для задач современной оптической связи / А. А. Шустова, С. Г. Алексеев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 232–235.

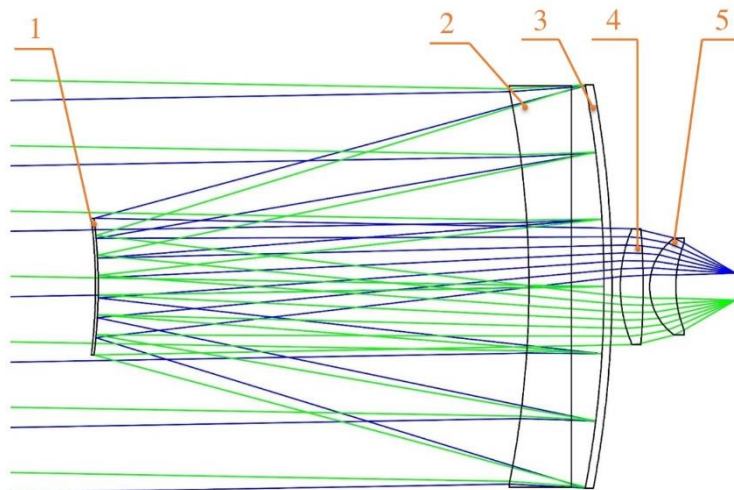
Введение

В настоящее время большой интерес исследователей представляет разработка телескопических систем, не имеющих корпуса в своем составе. Зачастую такие телескопы применяются для дистанционного зондирования Земли, космических исследований, а также в спутниковой и плането-спутниковой связи. Важным преимуществом открытых оптических систем является их обладание высокой светосилой вследствие возможности значительного увеличения диаметра входного зрачка системы. По этой причине появляется возможность увеличения дальности действия системы при относительно малых массогабаритных характеристиках. Одним из наиболее известных примеров открытых телескопических систем является телескоп Джеймс Уэбб [1]. Данная работа посвящена расчету оптимальных конструктивных параметров оптической системы Кассегрена, в которой отсутствует первая линза и одно из зеркал вынесено за пределы корпуса.

Оптическая схема и конструкция открытого телескопа Кассегрена

На рисунке 1 представлена оптическая схема, которая является одним из наиболее оптимальных результатов проведенного исследования. Излучение, исходящее от отдаленного источника, отражается от первичного зеркала поз. 3, отражается от вторичного зеркала поз. 1 и попадает на приемник излучения. Линза 2, а также линзы 4 и 5 необходимы в системе для фокусировки пятна рассеяния. Расстояние от первичного зеркала до последней

поверхности последней линзы в рабочем режиме телескопа составляет 195 мм. Радиус пятна рассеяния системы равен 1.74 мкм. На рисунке 2 проиллюстрирована демонстрационная версия конструкции. В реальной конструкции подразумевается присутствие механизма, позволяющего сделать вторичное зеркало складным либо выдвижным, что уменьшает габариты телескопа при выводе его на орбиту.



1 – вторичное зеркало; 2 – линза; 3 – первичное зеркало; 4 и 5 – корректирующие линзы

Рис. 1. Оптическая схема разрабатываемого телескопа

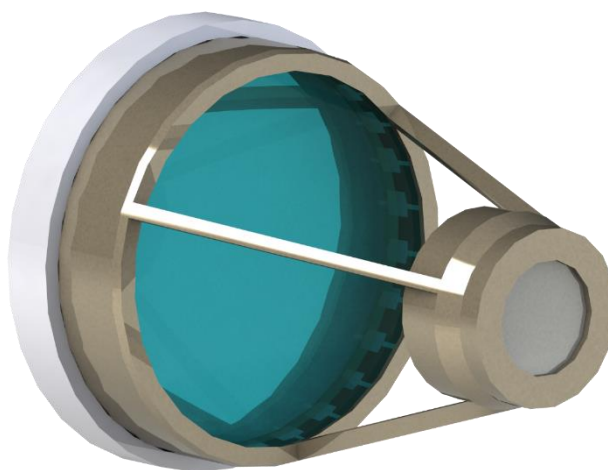


Рис. 2. Демонстрационный вид конструкции для открытого телескопа Кассегрена

Расчет отношения сигнал-шум открытого телескопа Кассегрена

Известны системы, схожие по габаритам с рассчитанной, имеющие дальность действия в пределах 1500 км [2]. Для данной работы был проведен расчет отношения сигнал-шум (ОСШ), показывающий возможность действия телескопа на расстояниях до 5000 км, как пример одного из значений зоны средних околоземных орбит [4]. При вычислении ОСШ была определена доля энергии излучения, передаваемая на приемное устройство:

$$k = \frac{S_{1 \text{ зеркала}}}{S_{\text{пятна лазера}}} \cdot \frac{S_{2 \text{ зеркала}}}{S_{1 \text{ зеркала}}}, \quad (1)$$

где $S_{1 \text{ зеркала}}$ и $S_{2 \text{ зеркала}}$ – соответственно площади первичного и вторичного зеркал, а $S_{\text{пятна лазера}}$ находится при вычислении радиуса пятна приходящего на приемник излучения:

$$r \approx \frac{\varphi}{2} \cdot L, \quad (2)$$

где L – дальность действия устройства, φ – угловая расходимость лазера, находящаяся по формуле:

$$\varphi = \frac{2.44 \cdot \lambda}{d} \quad (3)$$

λ – рабочая длина волны, равная 1340 нм для данного случая, d – диаметр выходной апертуры лазера.

Отношение сигнал-шум было вычислено по формуле:

$$SNR = \frac{P_{\text{лазера}} \cdot k}{P_{\text{шум}}} \quad (4)$$

$P_{\text{шум}}$ – шумы, появляющиеся на матричном приемнике излучения, которые для современных приемо-передатчиков равны 3-10 нВт [3]. Результаты выполненного расчета отношения сигнал-шум в зависимости от дальности и мощности лазерного излучателя представлены на рисунке 3.

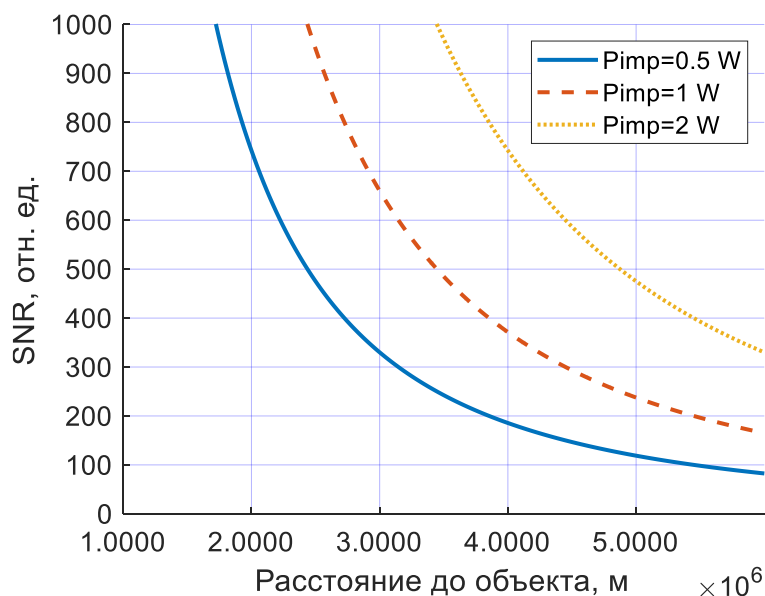


Рис. 3. График зависимости отношения сигнал-шум от дальности до объекта для трех значений мощности лазера

Заключение

В рамках данной работы был выполнено численное моделирование системы, предназначенной для задач оптической связи в космическом пространстве. Был проведен предварительный расчет отношения сигнал-шум для трех значений мощности лазерного

источника. Преимущество системы заключается в увеличенной дальности для выбранного габарита за счет отсутствия первой линзы в телескопе Кассегрена и вынесения вторичного зеркала за пределы корпуса системы. Полученная система может найти применение как в системах оптической связи, так и в задачах, связанных с дистанционным зондированием Земли и получении высококонтрастных изображений отдаленных космических объектов. Выполненное моделирование показывает востребованность подобных систем и требует дальнейших исследований.

Список источников

- [1] **Gardner, J. P.** The James Webb Space Telescope Mission / J.P. Gardner, J.C. Mather, R. Abbott, J.S. Abell, M. Abernathy, F. E. Abney, J.G. Abraham, R. Abraham, Y. M. Abul-Huda, S. Acton, et al. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2023. – Vol 135. – 24 p.
- [2] **Li, L.** Advanced Space Laser Communication Technology on CubeSats / L. Li, X. J. Zhang, J. H. Zhang, et al. // ZTE Communications. – 2020. – Vol 18. – P. 45-54.
- [3] Универсальный совместимый приемопередатчик / URL: <https://www.optcore.net/product/10gbs-smf-1550nm-ultra-long-100km-sfp-ezr-optical-transceiver-module/>
- [4] Классификация околоземных орбит / URL: <https://universemagazine.com/ru/klassyfykaczyya-okolozemnyh-orbyt/>

Modeling of the open Cassegrain Telescope for Modern Free-Space Communication Research

A. A. Shustova¹, S. G. Alexeev^{1,2,3}

¹ JSC SR Space, Moscow, Russia

² Geophotonics LLC, Saint Petersburg, Russia

³ JSC GC DYNAMICS, Moscow, Россия

Burst growth of optical systems for Earth's remote sensing and free-space optical communication channels drives to requirement in efficient telescopic systems. An open Cassegrain telescope, due to best possible mass-dimension characteristics, presents the most promising and reliable configuration. This report introduces optimal key parameters combinations computational research for such telescopes that rely on specific requirements of contemporary industry. The novelty of this development is achieving maximum aperture ratio to dimension, based on the absence of a primary lens and the relocation of one of the mirrors outside the main body.

Keywords: Cassegrain telescope, Laser communication, Open telescope, Earth remote sensing, Satellite communication.

Элементы сложносоставных модуляторов для систем квантовой связи на боковых частотах

Н. Д. Герасименко², В. С. Герасименко^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² ООО "СМАРТС-Кванттелесом", Санкт-Петербург, Россия

В системах квантовой связи на боковых частотах основными элементами являются фазовые модуляторы, однако с ними соседствуют и другие, зачастую не менее важные компоненты. Главные из них — это перестраиваемый аттенюатор в блоке отправителя (в Алисе) и связка двух фазовых модуляторов с поляризационными светоделителями в блоке получателя (в Бобе). Подсистема модулятор-аттенюатор в Алисе необходима для того, чтобы гарантировать отправку в канал однофотонного состояния в правильное время. Использование же поляризационных делителей и двух модуляторов в Бобе связано с тем, что модуляторы — поляризационно-зависимые устройства, а канал связи — обычный одномодовый. В данной работе рассматривается моделирование интегрально-оптических элементов, позволяющих объединить названные подсистемы на одном чипе.

Ключевые слова: Фазовая модуляция света, Амплитудная модуляция света, Управление светом, Интегральная оптика, Ниобат лития.

Цитирование: Герасименко, Н. Д. Элементы сложносоставных модуляторов для систем квантовой связи на боковых частотах / Н. Д. Герасименко, В. С. Герасименко // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 236–239.

Введение

Системы квантовой рассылки ключа (КРК) на боковых частотах (БЧ) активно разрабатываются уже больше 10 лет [1]. Именно такие системы использовались при первой в России передаче квантового ключа по городской оптоволоконной сети [2]. Они же применяются в создаваемых сейчас междугородних линиях квантовой связи.

За это время было сделано многое для повышения скорости генерации квантового ключа и защиты системы от различных атак [2, 3]. Главными из них являются троянский конь и лазерное повреждение. В первом случае злоумышленник (Ева) отправляет в квантовый канал импульс большой мощности, чтобы по результатам анализа отраженного света судить о состоянии устройства, кодирующего информацию (в случае КРК БЧ — электрооптического фазового модулятора) [4]. Обычно такую атаку предпринимают против блока получателя (Боба), но возможность подобного воздействия на блок отправителя (Алису) нужно учитывать. Во втором варианте атаки злоумышленник использует обстоятельство, что в любые системы КРК ослабляют до одиночных фотонов излучение лазерного источника и используют для этого обычно оптомеханические устройства. Это позволяет Еве попытаться своим мощным лазером повредить аттенюатор в Алисе, чтобы увеличить число фотонов в канале [5].

1. Составное устройство в блоке отправителя

Оптическая схема Алисы состоит из лазерного источника (Laser), изолятора (IO), статического оптического аттенюатора (FOA), линейного поляризатора (LP), электрооптического фазового модулятора (PSM1), соединенных последовательно волокнами с сохранением поляризации, и перестраиваемого аттенюатора (VOA), как изображено на рис. 1а [3]. Из перечисленных компонентов три можно объединить в одном устройстве: линейный поляризатор, фазовый модулятор и перестраиваемый аттенюатор. В принципе для этого достаточно модифицировать волноводную схему типичного амплитудного модулятора на подложке ниобата лития как показано на рис. 1б: сместить волноводный интерферометр Маха-Цендера (ИМЦ) под область электрода постоянного тока (DC), а линейный волновод со стороны входа схемы расположить с помощью S-образных изгибов в зазор между СВЧ электродами. При этом все остальные элементы модулятора остаются без изменений [6]. Также можно отметить, что при использовании предложенной схемы попытка лазерного повреждения не приведет к увеличению числа фотонов в канале, а даже если повреждение случится — потери только возрастут. С точки же зрения опасности применения троянского коня ИМЦ в состоянии с низким пропусканием не зависит от направления прохода, так что потенциальный «сканирующий» импульс все равно испытает двойное ослабление; кроме того, количество отражающих поверхностей в схеме сократится.

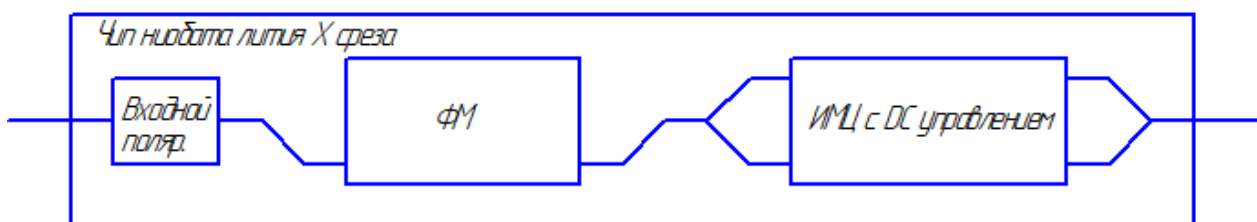
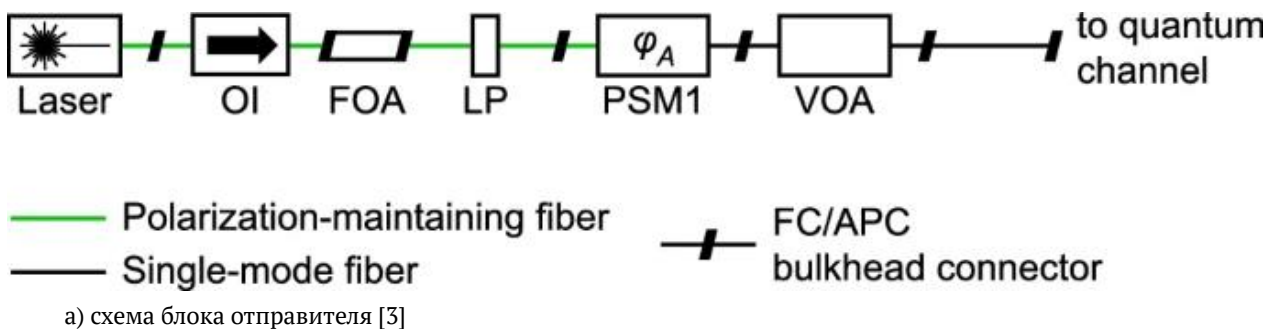
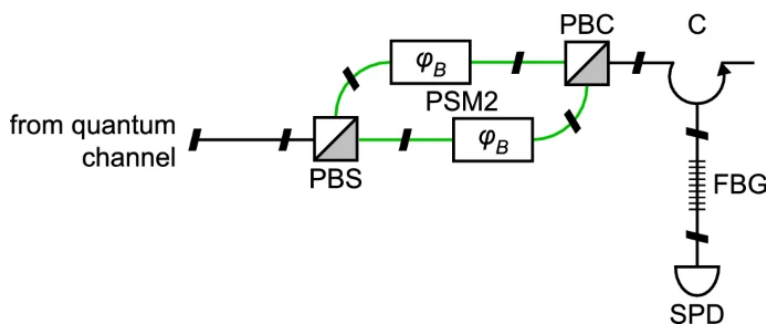


Рис. 1. Оптические компоненты Алисы

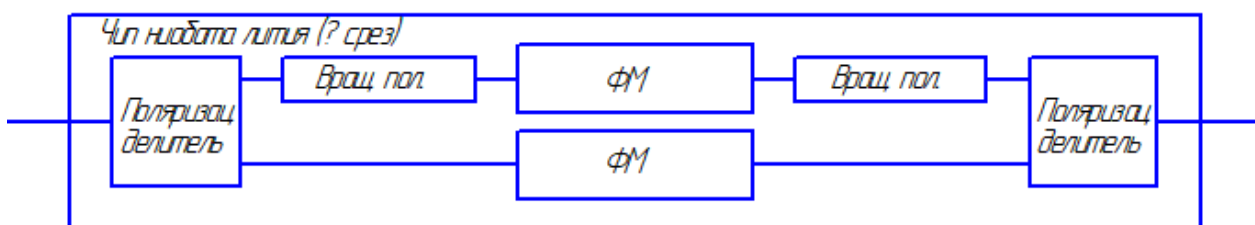
2. Составное устройство в блоке получателя

В схеме же Боба используются поляризационный делитель (PBS), два соединенных параллельно электрооптических фазовых модулятора (PSM2), поляризационный объединитель (PBC), оптический циркулятор (C), светофильтр на основе Брегговской решетки

(FBG) и однофотонный детектор (SPD), изображенные на рис. 2а, при этом волокна от выхода PBS до входа PBC (в обоих случаях включительно) сохраняют поляризацию[3]. В данном случае можно попытаться объединить часть, собранную на волокнах с сохранением поляризации: волноводные поляризационные делители отличаются от неполяризационных только протяженностью области перекачки энергии, при этом делители и объединители устроены одинаково; с фазовыми модуляторами сложнее — в силу линейности электрооптического эффекта в ниобате лития при симметричном расположении волноводов относительно СВЧ электрода возникающая фазовая задержка будет иметь противоположные знаки, — скорее всего, придется делать два независимых СВЧ электрода с одинаковым относительно них расположением волноводов; также отдельной задачей оказывается получение вращателей поляризации, при этом решать ее можно несколькими способами. Тем не менее получение этого усложненного на этапе производства составного модулятора позволит упростить настройку и эксплуатацию Боба и может ограниченно повысить его защищенность от атак типа троянский конь.



а) схема блока получателя [3]



б) схема комбинированного устройства, объединяющего PBS (Поляризац. делитель), PSM2 (ФМ) и PBC (Поляризац. делитель), требует добавления вращателей поляризации

Рис. 2. Оптические компоненты Боба

Заключение

В данной работе были предложены схемы сложносоставных модуляторов на подложках ниобата лития, объединяющие несколько узлов, используемых в системах КРК БЧ, на одном чипе. Предложенные комбинированные устройства в той или иной степени улучшают защищенность Алисы и Боба от наиболее распространенных атак и потенциально улучшают их эксплуатационные характеристики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Egorov, V. I.** Analysis of a sidebands-based quantum cryptography system with different detector types / V. I. Egorov, D. N. Vavulin, I. Z. Latypov, A. V. Gleim, A. V. Rupasov // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. – 2013. – Vol. 4. – №. 2. – P. 190-195.
- [2] **Gleim, A. V.** Sideband quantum communication at 1 Mbit/s on a metropolitan area network / A. V. Gleim, V. V. Chistyakov, O. I. Bannik, V. I. Egorov, N. V. Buldakov, A. B. Vasilev, A. A. Gaïdash, A. V. Kozubov, S. V. Smirnov, S. M. Kynev, S. É. Khoruzhnikov, S. A. Kozlov, V. N. Vasil'ev // *Journal of Optical Technology*. – 2017. – Vol. 84. – №. 6. – P. 362-367.
- [3] **Sajeed S.** An approach for security evaluation and certification of a complete quantum communication system / S. Sajeed, P. Chaiwongkhot, A. Huang, H. Qin, V. Egorov, A. Kozubov, A. Gaidash, V. Chistiakov, A. Vasiliev, A. Gleim, V. Makarov // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – №. 1. – P. 5110.
- [4] **Jain N.** Trojan-horse attacks threaten the security of practical quantum cryptography / N. Jain, E. Anisimova, I. Khan, V. Makarov, C. Marquardt, G. Leuchs // *New Journal of Physics*. – 2014. – Vol. 16. – №. 12. – P. 123030.
- [5] **Huang A.** Laser-damage attack against optical attenuators in quantum key distribution / A. Huang, R. Li, V. Egorov, S. Tchouragoulov, K. Kumar, V. Makarov // *Physical Review Applied*. – 2020. – Vol. 13. – №. 3. – P. 034017.
- [6] **Петров В.М.** Отечественные СВЧ интегрально-оптические модуляторы для квантовых коммуникаций / В. М. Петров, А. В. Шамрай, И. В. Ильичев, П. М. Агрузов, В. В. Лебедев, Н. Д. Герасименко, В. С. Герасименко // *Фотоника [Photonics Russia]* – 2020. – Т. 14. – № 5. – С. 414-423
- [7] Голография. Наука и практика / URL: <http://www.holoexpo.ru>
- [8] **Zherdev, A. Y.** Modeling of spatial-frequency spectrum of security holograms and optoelectronic spectrum analyzer for their identification in real time / A. Y. Zherdev, S. B. Odinson, D. S. Lushnikov // *SPIE Conference Proceeding*. – 2011. – Vol. 8074. – P. 80740R. – DOI:10.1117/12.886456.

Elements of complex modulators for quantum communication systems at side bands

N. D. Gerasimenko², V. S. Gerasimenko^{1,2}

¹ ITMO University, Saint Petersburg, Russia

² Quanttelecom LLC, Saint Petersburg, Russia

In systems of quantum communication at side bands, phase modulators are the main elements, but there are other important components too. The main ones are a variable optical attenuator in the sender unit (in Alice) and a bundle of two phase modulators with polarization beam splitters in the receiver unit (in Bob). The modulator-attenuator subsystem in Alice is needed to ensure that the proper single-photon state is sent to the channel at the correct time. The use of polarization splitters and two modulators in Bob is due to the fact that modulators are polarization-dependent devices, and the communication channel is an ordinary single-mode one. In this paper, we consider the modeling of integrated optical elements that make it possible to combine these subsystems on a single chip.

Keywords: Phase modulation of light, Amplitude modulation of light, Light control, Integrated optics, Lithium niobate.

Интерференционный микроскоп фазового сдвига для контроля параметров шероховатости поверхностей оптических деталей

И. Ю. Фандиенко^{1,2}, Г. Н. Вишняков², В. Л. Минаев², Р. В. Минаев¹

¹ ООО «Электростекло», Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

Разработан и экспериментально подтверждён метод динамической интерферометрии фазового сдвига для контроля локальных отклонений микро- и нанометрового уровня поверхностей оптических деталей от заданного профиля. Разработан и создан микроскоп интерференционный «НаноСкан» со специальным программно-аппаратным комплексом для управления измерениями и анализом результатов. Экспериментально подтверждены метрологические и технические характеристики разработанного прибора. Представлены результаты измерений среднего квадратического отклонения локальных дефектов поверхностей тисненных голограмм, а также крупногабаритных оптических деталей. Обеспечивается прослеживаемость измерений в соответствии с государственной поверочной схемой, утвержденной приказом Росстандарта от 06.11.2019 № 2657, к ГЭТ 113-2014. Микроскоп интерференционный «НаноСкан» включен в Федеральный информационный фонд под № 87394-22.

Ключевые слова: Оптический контроль, Крупногабаритная оптика, Интерферометрия, Профилометрия, Голография, Измерения шероховатости поверхности, Метод фазовых шагов, Микроскоп интерференционный.

Цитирование: Фандиенко, И. Ю. Интерференционный микроскоп фазового сдвига для контроля параметров шероховатости поверхностей оптических деталей / И. Ю. Фандиенко, Г. Н. Вишняков, В. Л. Минаев, Р. В. Минаев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 240–246.

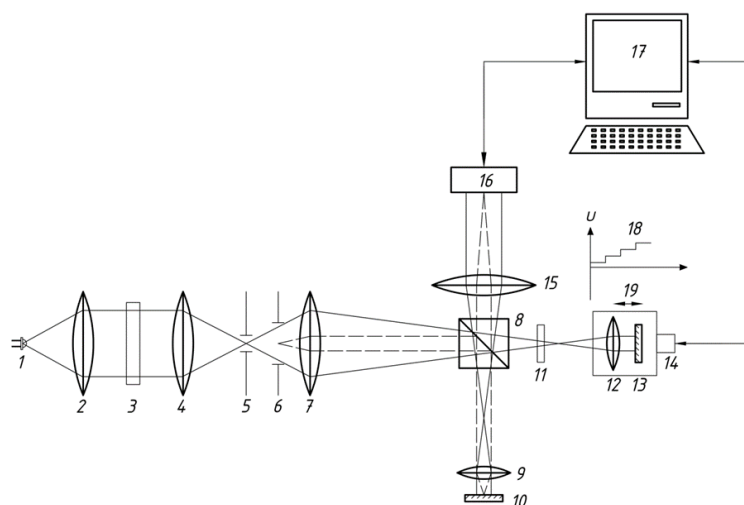
Введение

В современной метрологии оптических изделий и систем наряду со сканирующими зондовыми микроскопами, работающими в контактном и бесконтактном режимах, получают распространение бесконтактные методы профилометрии, базирующиеся на принципах лазерной интерферометрии высокого пространственного разрешения. Оптическая микроинтерферометрия, основанная на реконструкции фазы методом фазовых шагов, является одним из наиболее эффективных методов оценки параметров структуры поверхностей оптических изделий. С целью обеспечения высокой точности, скорости и воспроизводимости получаемых в процессе контроля результатов состояния поверхностного слоя деталей в ООО «Электростекло» был разработан интерференционный микроскоп фазового сдвига «НаноСкан-01».

1. Принцип действия

Принцип действия прибора основан на интерференции световых пучков излучения, отраженных от опорного зеркала и измеряемой поверхности. Микроскоп интерференционный реализован по схеме В.П. Линника. Получение информации о микрорельефе осуществляется с помощью метода фазового сдвига при помощи управляемого от персонального компьютера зеркала на пьезоэлементе, встроенного в опорное плечо микроскопа. Для этого интерференционные картины при различных положениях опорного зеркала регистрируются с помощью встроенного многоэлементного фотоприемного устройства и передаются в персональный компьютер. Для осуществления управления сдвигом пьезоэлемента и расшифровки интерферограмм разработано специальное программно-математическое обеспечение (СПМО) «MicroScan» для операционной среды WINDOWS. В результате математической обработки результатов измерений восстанавливается оптическая разность хода, соответствующая измеряемому профилю поверхности, по которой рассчитываются параметры шероховатости. Результаты измерений в виде таблиц с параметрами и двумерного распределения высоты и графиков

Оптическая схема микроскопа интерференционного представлена на рисунке 1.



1 — источник излучения; 2, 4 — ахроматические линзы; 3 — светофильтр; 5 — апертурная диафрагма; 6 — полевая диафрагма; 7 — конденсор; 8 — светоделитель; 9, 12 — микрообъективы; 10 — исследуемый объект; 11 — затвор; 13 — опорное зеркало; 14 — микрометрический винт; 15 — проекционная линза; 16 — многоэлементное ФПУ; 17 — персональный компьютер; 18 — вид сигнала, подаваемого на пьезопривод; 19 — узел, объединяющий микрообъектив и опорное зеркало

Рис. 1. Оптическая схема микроскопа интерференционного «НаноСкан-01»

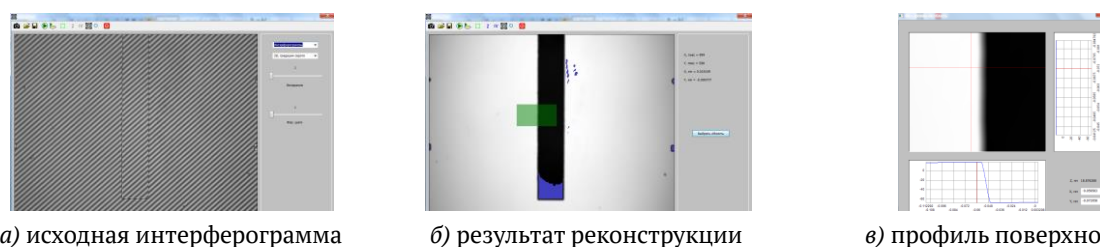
Микроскоп работает по следующему принципу. Изображение источника излучения 1 строится с помощью оптической системы, состоящей из двух ахроматических линз 2 и 4, в плоскости апертурной диафрагмы 5. Между линзами, в области хода параллельного пучка, расположен интерференционный светофильтр 3. С помощью конденсора 7 изображение апертурной диафрагмы переотражается в передние фокальные плоскости идентичных

микрообъективов 9 и 12 после предварительного разделения на предметный и опорный пучки с помощью светоделителя 8. Предметный пучок (вертикальный) падает на исследуемый объект 10 и, отразившись от него, проходит через тот же микрообъектив и светоделитель. Опорный пучок (горизонтальный) падает на опорное зеркало 13. Отраженный от опорного зеркала пучок также проходит через микрообъектив и светоделитель. Оба пучка (предметный и опорный), пройдя через проекционную линзу 15, строят изображение предмета и опорного зеркала в плоскости фотодетектора – матрицы видеокамеры 16. Видеокамера управляется от персонального компьютера 17. В передней фокальной плоскости конденсора 7 расположена полевая диафрагма 6, оптически сопряженная с плоскостью опорного зеркала, объекта и с матрицей камеры. В опорном канале расположен затвор 11, который позволяет перекрывать этот канал, выключать интерференционный режим работы и переводить микроскоп в режим оптического микроскопа на отражение. Проекционный объектив 9 строит изображение измеряемого предмета, опорного зеркала и полевой диафрагмы на матрице камеры. Опорное зеркало 13 вместе с микрообъективом 12 составляет единый узел, который может перемещаться с помощью микрометрической подвижки, для настройки разности хода между каналами и регулировки контраста полос. Само зеркало наклеено на пьезоэлемент, который обеспечивает его точное перемещение для реализации метода фазовых шагов. Пьезопривод управляется через блок управления от персонального компьютера [1-6].

2. Программное обеспечение

В СПМО «MicroScan» комплекса предусмотрена возможность реконструкции поверхности объекта с вычитанием базовой поверхности и без ее вычитания.

Вычитание базы позволяет устранить aberrации оптической системы за счет предварительной регистрации волнового фронта без объекта. В случае реконструкции без вычитания базы устранение aberrации происходит за счет вычитания из реконструируемого волнового фазового фронта синтезированной полиномами двумерного распределения фазы. В этом случае, в зависимости от настроек, сделанных при монтаже системы, используются либо полиномы Цернике, либо двумерный полином 2-го порядка. На рисунке 2 представлены виды окна программы «MicroScan» с исходной интерферограммой (рис.2.а), результатом реконструкции 3D профиля поверхности (рис.2.б) и увеличенным участком поверхности, выделенным зеленым цветом, с 1D профилями поверхности (рис.2.в).



а) исходная интерферограмма

б) результат реконструкции

в) профиль поверхности

Рис. 2. Виды окна программы «MicroScan» для детального просмотра восстановленной поверхности исследуемого объекта

В качестве объекта исследования использовалась мера шероховатости SHS-1800 QS, зав. №8897-33-16, с номинальным значением параметра шероховатости $R_{\max}=0,180$ мкм из набора «Эталона единицы длины в области измерения параметров шероховатости R_{\max} в диапазоне от 0,02 до 1,8 мкм и R_a номинального значения 0,0015 мкм». Мера представляет собой ступеньку (полоску) высотой около 180 нм. В центральной части рисунка 2 синим цветом выделены области, где по условиям низкой освещенности расчет оказался невозможным. Дальнейшие вычисления по этим областям не производятся.

3. Контроль крупногабаритных деталей

С целью осуществления прецизионного позиционирования и перемещений разработанного прибора по задаваемой координатной сетке крупногабаритных оптических деталей был разработан и изготовлен прецизионный координатный портал с ЧПУ. Помимо требований по обеспечению точности и повторяемости позиционирования к данному устройству предъявлялись высокие требования по исключению влияния вибрационных резонансов на измерительный комплекс в процессе его юстировки и эксплуатации.

В качестве основной, была выбрана конструкция портала с подвижным столом, что положительно сказывается на режимах работы комплекса. На рисунке 3 представлен внешний вид измерительного комплекса.



а) конструкция с расширенным порталом



б) стандартная конструкция

Рис. 3. Внешний вид измерительного комплекса на основе микроскопа интерференционного «НаноСкан-01», установленного на прецизионном координатном портале с ЧПУ для исследования параметров поверхностей крупногабаритных оптических деталей

В конструкции применены чугунные несущие элементы. Чугунная конструкция по сравнению со стальной имеет более высокую жесткость и способность к поглощению вибрации. Большая плоскость поперечного сечения элементов дает минимальные отклонения микроскопа интерференционного при проведении исследований и позволяет достичь высокой точности позиционирования.

Для эффективного противодействия вибрациям ЧПУ портал с установленным микроскопом интерференционным «НаноСкан» размещен на гранитной плите и развязан по вибрационным нагрузкам с применением специализированных виброопор.

4. Результаты испытаний

Испытания в целях утверждения типа микроскопов интерференционных «НаноСкан-01» были проведены Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГБУ «ВНИИОФИ»). В результате испытаний микроскоп интерференционный «НаноСкан-01» как средство измерений внесен в Федеральный информационный фонд под рег. №87394-22.

Метрологические и технические характеристики микроскопа «НаноСкан-01», взятые из его Описания типа, приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Метрологические характеристики микроскопа

Наименование параметра	Значение
Диапазон измерений параметров шероховатости Ra, мкм*	от 0,02 до 0,07
Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений параметра шероховатости Ra, мкм, не более	0,0008
Диапазон измерений параметров шероховатости Rmax, мкм*	от 0,02 до 0,2
Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений параметра шероховатости Rmax, мкм, не более	0,003
* Базовая длина для параметров Ra, Rmax определяется по ГОСТ 2789-73.	

Таблица 2. Технические характеристики микроскопа

Наименование параметра	Значение
Поле зрения, мм, не более	1×1
Длина волны излучения, нм	532
Диапазон показаний параметров шероховатости Rmax, Rz, Ra, Rq по ГОСТ 25142-82, мкм	от 0,0001 до 0,2
Диапазон показаний параметров шероховатости Sz, Sa, Sq по ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, мкм	от 0,0001 до 0,2
Алгоритм расшифровки интерферограмм	метод фазовых шагов
Размерность изображения, пиксель, не менее	1920×1200
Число вводимых градаций яркости, бит, не менее	12
Время измерения и обработки, сек, не более	30
Число шагов для реконструкции интерферограмм методом фазовых шагов, не менее	5
Электропитание от сети переменного тока: - напряжением, В - частотой, Гц	от 200 до 250 от 50 до 60
Габаритные размеры (длина×ширина×глубина), мм, не более	500×250×200
Масса, кг, не более	5
Условия эксплуатации: - температура окружающей среды, °С - относительная влажность воздуха, %	от +15 до + 25 от 50 до 80

Микроскоп «НаноСкан-01» был также опробован для целей исследования структуры поверхности тисненных радужных голограмм. Результаты на рисунке 4.

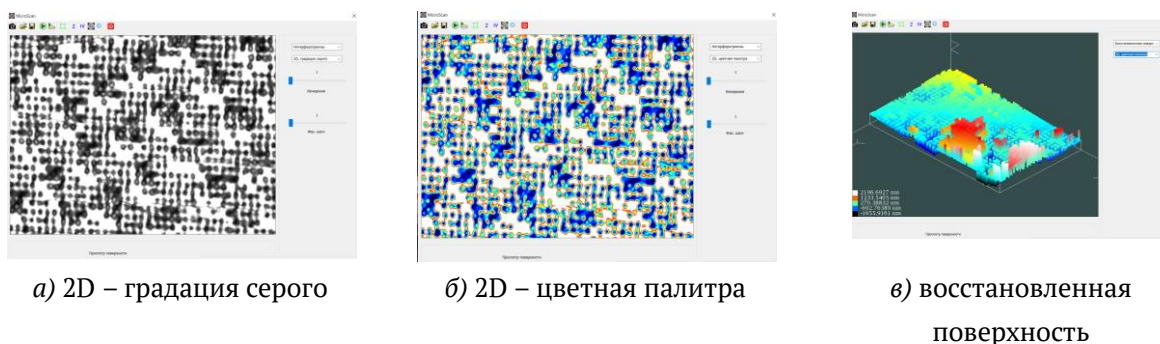


Рис. 4. Восстановленные топограммы поверхности тисненной радужной голограммы (полутоновое, псевдоцветное и аксонометрическое изображение)

Заключение

В ходе работы был разработан и экспериментально подтверждён метод динамической интерферометрии фазового сдвига для контроля локальных отклонений микро- и нанометрового уровня поверхностей оптических деталей от заданного профиля. Также были созданы микроскоп интерференционный «НаноСкан» и специальный программно-аппаратный комплекс для управления измерениями и анализом результатов. Экспериментально подтверждены метрологические и технические характеристики разработанного прибора. Представлены результаты измерений среднего квадратического отклонения локальных дефектов поверхностей тисненных голограмм, а также крупногабаритных оптических деталей.

Список источников

- [1] Назаров Ю. Ф., Шкилько А. М., Тихоненко В. В., Компанец И. В. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5. – № 3-4. – С. 207-216.
- [2] Мальков, О. В. Измерение параметров шероховатости поверхности детали / О. В. Мальков, А. В. Литвиненко. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)", 2012. – 22 с. – EDN ZEFI GL.
- [3] Айрапетян В. С., Губин С. Г., Макеев А. В. Оптические исследования шероховатости // Труды XV Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». Новосибирск.: НГТУ. – 2014. – С.8 – 10.
- [4] Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Орлов В. М. Измерение параметров микронеровностей крупногабаритных шлифованных поверхностей оптических деталей при помощи лазерной интерферометрии // Метрология. – 2009. – № 9. – С. 15-24.
- [5] Линник В. П. Простой интерферометр для исследования оптических систем // Труды ГОИ. Том X. – 1933. – №. 95.
- [6] Вишняков Г. Н. и др. Методы автоматизации обработки интерферограмм фазовых объектов // Метрология. – 2008. – №. 4. – С. 15-25.

Phase shift interference microscope for monitoring the surface roughness parameters of optical parts

I. Y. Fandienko^{1,2}, G. N. Vishnyakov², V. L. Minaev², R. V. Minaev¹

¹ Crystaltechno, Moscow, Russia

² FSUE «All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements», Moscow, Russia

A method of dynamic phase shift interferometry has been developed and experimentally confirmed to control local deviations of the micro- and nanometer levels of the surfaces of optical parts from a given profile. An interference microscope "NanoScan" with a special software and hardware system for controlling measurements and analyzing results was developed and created. The metrological and technical characteristics of the developed device are experimentally confirmed. The results of measurements of the mean square deviation of local defects in the surfaces of embossed holograms, as well as large-sized optical parts, are presented. The traceability of measurements is ensured in accordance with the state verification scheme approved by the order of Rosstandart dated November 6, 2019 No. 2657, to GET 113-2014. The interference microscope "NanoScan" is included in the Federal Information Fund under No. 87394-22.

Keywords: Optical control, Large-sized optics, Interferometry, Profilometry, Holography, Surface roughness measurements, Phase step method, Interference microscope.

Измерение характеристик тонких пленок оптическим датчиком на основе спиральной зонной пластины

Е. С. Козлова^{1,2}, А. Г. Налимов^{1,2}, В. В. Котляр^{1,2}, С. С. Стафеев^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН; Молодогвардейская, 151, Самара, 443001, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет; Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

Предложены методика и оптический датчик для бесконтактного определения малых смещений, толщин тонких пленок, их показателей преломления и углов наклона. Датчик состоит из источника лазерного излучения, амплитудной спиральной зонной пластинки третьего порядка с высокой числовой апертурой и ПЗС-камеры, соединенной с компьютером. Измеряя угол поворота трехлепесткового распределения интенсивности, можно измерить: минимальный сдвиг вдоль оптической оси около 7 нм (длина волны 532 нм), изменение толщины пластины на 3 нм, изменение наклона угла пластины на 0,1 градуса, а изменение показателя преломления на 0,01.

Ключевые слова: Спиральная зонная пластинка, Датчик толщины, Датчик перемещения, Метод FDTD, СБОМ.

Цитирование: Козлова, Е. С. Измерение характеристик тонких пленок оптическим датчиком на основе спиральной зонной пластины / Е. С. Козлова, А. Г. Налимов, В. В. Котляр, С. С. Стафеев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 247–249.

Введение

Вращающиеся лазерные лучи, содержащие двухлепестковое распределение интенсивности, давно используются для увеличения продольного разрешения в оптических микроскопах. Двухлепестковая функция рассеяния точки позволяет определять трехмерное положение отдельной молекулы или квантовой точки с точностью 10–20 нм [1]. В этих работах вращающийся луч был создан с помощью модулятора света. С целью миниатюризации оптического датчика в нашей работе предлагается использовать микроэлемент в виде спиральной бинарной амплитудной зонной пластины третьего порядка с высокой числовой апертурой и размером всего 8x8 мкм, выполненной в тонкой алюминиевой пленке толщиной 60 нм.

Результаты исследования

В данной работе рассматривается трехлепестковый вращающийся лазерный пучок, сформированный с помощью спиральной зонной пластины (ЗП) третьего порядка. В пучке, прошедшем ЗП, формируются три локальных максимума интенсивности. Если ЗП сместить вдоль оптической оси, то эти три локальных максимума интенсивности будут вращаться вокруг оптической оси. Если измерить угол поворота трехлепесткового распределения интенсивности с помощью ПЗС-камеры, то мы сможем определить сдвиг ЗП. Поместив между ПЗС-камерой и ЗП тонкую пленку, можно определить ее толщину путем измерения угла

поворота трехлепесткового луча. Смещая пленку поперек оптической оси, можно измерить микрорельеф пленки по сечению, измеряя угол поворота трехлепесткового луча. Если между ЗП и ПЗС-камерой поместить тонкую кювету с жидкостью, то, используя угол поворота трехлепесткового луча, можно определить показатель преломления жидкости. Кроме того, если тонкую пластину, помещенную между ЗП и ПЗС-камерой, наклонить на небольшой угол вокруг оси, перпендикулярной оптической оси, то этот угол наклона можно оценить по углу поворота трехлепесткового пучка.

Заключение

На основе метода FDTD разработана методология простого оптического датчика на базе ЗП третьего порядка, позволяющего оценивать сразу несколько параметров: сдвиг, профиль толщины или рельефа, угол наклона и показатель преломления. Показано, что смещение выходной плоскости примерно на 2 мкм от поверхности ЗП приводит к почти линейному повороту трехлепесткового пучка примерно на 260° . Достигнутая угловая скорость вращения 130 град/мкм более чем в 2 раза выше, чем в аналогичных работах [1, 2]. Показано, что если между ЗП и ПЗС-камерой поместить тонкую пленку толщиной от 200 нм до 1400 нм, то изменение толщины пленки можно оценить по углу поворота трехлепестковой картины интенсивности с точностью до 35 нм, минимальное обнаруживаемое изменение толщины пленки составляет 3 нм. Показано, что этот оптический датчик позволяет оценить показатель преломления тонких пленок, если известна их толщина. При этом точность определения показателя преломления составляет 0,019. Он также может измерять угол наклона α на несколько градусов тонкой прозрачной пленки. В этом случае точность составляет около $0,1^\circ$.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда грант № 23-12-00236.

Список источников

- [1] **Backlund, M. P.** The double-helix point spread function enables precise and accurate measurement of 3D single-molecule localization and orientation / M. P. Backlund, M. D. Lew, A. S. Backer, S. J. Sahl, G. Grover, A. Agrawal, R. Piestun, W. E. Moerner // SPIE Conference Proceeding - 2013. - Vol. 8590. - P. 85900L.
- [2] **Pavani, S.R.P.** High-efficiency rotating point spread functions / S.R.P. Pavani, R. Piestun // Opt. Express. - 2008. - Vol. 16. - № 5ю - P. 3484-3489.

Measurement of the thin films characteristics by the optical sensor based on a spiral zone plate

E. S. Kozlova^{1,2}, A. G. Nalimov^{1,2}, V. V. Kotlyar^{1,2}, S. S. Stafeev^{1,2}

¹ Institute of Image Processing Systems RAS - branch of the Federal Research Center «Crystallography and Photonics» RAS; Molodogvardeiskaya, 151, Samara, 443001, Russia

² Samara National Research University; Russia, 443086, Samara, Moscow highway, 34

A technique and an optical sensor for non-contact determination of small displacements, thicknesses of thin films, their refractive indices and tilt angles are proposed. The sensor consists of a laser, a third- or second-order amplitude spiral zone plate with a high numerical aperture, and a CCD camera connected to a computer. By angle rotation measuring of the three-lobe intensity distribution the next parameters can be estimated: a minimum shift along the optical axis of about 7 nm (wavelength 532 nm), a change in plate thickness by 3 nm, a change in the tilt of the plate angle by 0.1 degrees, and a change in refractive index by 0.01.

Keywords: Spiral zone plate, Thickness sensor, Displacement sensor, FDTD method, SNOM.

Гониометрические методы измерений показателя преломления

Г. Н. Вишняков^{1,2}, А. И. Юрин^{3,1}

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Рассмотрены гониометрические методы измерений показателя преломления оптически прозрачных материалов. Предложен модифицированный метод, основанный на методе наименьшего отклонения, позволяющий определять показатель преломления трехгранных призм с неизвестными преломляющими углами. В предложенном методе производят измерения углов отклонения света на трех гранях призмы, а показатель преломления материала и преломляющие углы определяют из решения системы уравнений. Приведена оценка влияния погрешности угловых измерений на точность расчета показателя преломления.

Ключевые слова: оптика, показатель преломления, гониометрия

Цитирование: Вишняков, Г. Н. Гониометрические методы измерений показателя преломления / Г. Н. Вишняков, А. И. Юрин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 250–253.

Введение

Показатель преломления (ПП) вещества зависит от его агрегатного состояния, химического состава компонентов, температуры и т.д. Для измерения ПП широко используют гониометрические методы, основанные на измерении углов отклонения света, проходящего через образец - обычно трехгранную призму, изготовленную из исследуемого материала либо заполняемую исследуемым веществом [1].

Методы призмы

Методы призмы получили большую популярность для определения ПП благодаря простоте и высокой точности измерений. Подобные методы предполагают измерение углов падения и преломления луча, по которым вычисляют ПП материала призмы. При этом известны различные варианты их реализации - метод наименьшего отклонения (МНО) [2], метод автоколлимации и метод постоянного отклонения [3].

При прохождении через призму луч света, падающий под углом φ_1 , дважды преломляется и отклоняется на некоторый угол ε от первоначального направления (рис. 1), который можно рассчитать по формуле [4]:

$$\varepsilon = \varphi_1 - \alpha + \arcsin[n \sin(\alpha - \arcsin(\sin\varphi_1/n))], \quad (1)$$

где n – ПП материала призмы, α – преломляющий угол призмы.

Наименьшее возможное значение угла отклонения ε_{\min} определяется как минимум функции (1) по углу φ_1 :

$$\varepsilon_{\min} = 2\arcsin[n \sin(\alpha/2)] - \alpha. \quad (2)$$

Определение ε_{\min} и является сутью наиболее популярного МНО [5]. В этом случае для расчета ПП используют формулу (2):

$$n = \sin[(\alpha + \varepsilon_{\min})/2]/\sin(\alpha/2) \quad (3)$$

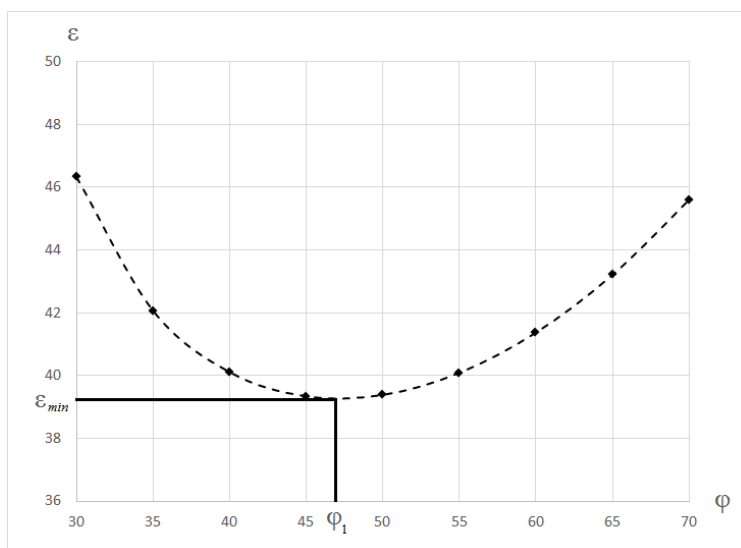


Рис. 1. Пример зависимости отклонения луча от угла падения на грань призмы

Таким образом, для расчета ПП с помощью МНО угол α должен быть заранее известен. Однако, можно модифицировать МНО таким образом, чтобы исключить необходимость наличия априорной информации о призме [6]. Суть модификации МНО состоит в следующем. Для определения ПП выполняют следующие операции:

1. Проводят измерения $\varepsilon_{\min\alpha}$, $\varepsilon_{\min\beta}$, $\varepsilon_{\min\gamma}$ на всех трех гранях призмы с углами α , β и γ .
2. Составляют систему уравнений исходя из (2):

$$\begin{cases} \varepsilon_{\min\alpha} = 2\arcsin(n \sin(\alpha/2)) - \alpha, \\ \varepsilon_{\min\beta} = 2\arcsin(n \sin(\beta/2)) - \beta, \\ \varepsilon_{\min\gamma} = 2\arcsin(n \sin(\gamma/2)) - \gamma, \\ \alpha + \beta + \gamma = 180^\circ. \end{cases} \quad (4)$$

3. Рассчитывают ПП и значения углов призмы α , β и γ из решения системы (4).

Таким образом, при применении подобного модифицированного метода можно одновременно определить ПП и углы призмы. Кроме того, численное моделирование показывает [7], что в этом случае результаты расчета ПП меньше зависят от погрешностей угловых измерений, чем в случае применения МНО (рис. 2).

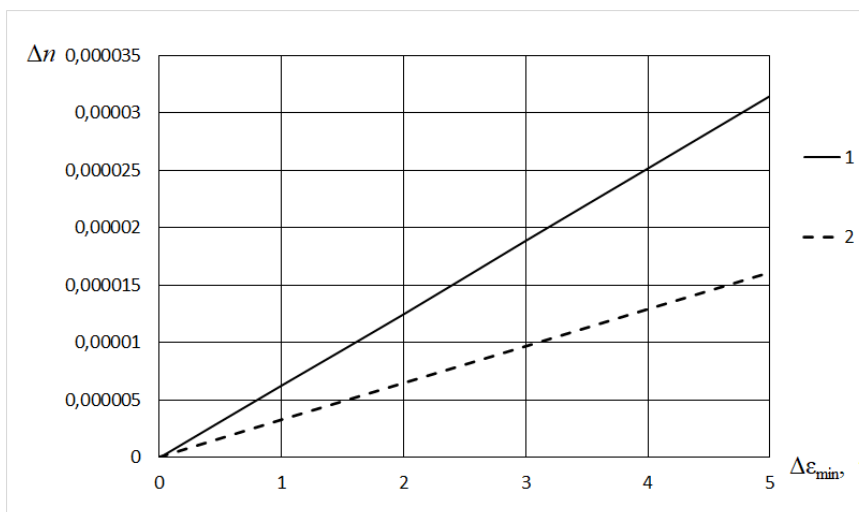


Рис. 2. Зависимость погрешности измерения Δn от погрешности угловых измерений $\Delta \varepsilon_{\min}$ для призмы с $\alpha = 60^\circ$ и $n = 1,5$: 1 – для классического МНО; 2 – для модифицированного МНО

Заключение

Рассмотренный в работе гониометрический метод измерения ПП можно применять для исследования оптически прозрачных материалов, а также жидких оптически прозрачных веществ, залитых в полую треугольную призму с плоскопараллельными прозрачными иллюминаторами.

Список источников

- [1] Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. — Л.: Химия, 1974.
- [2] ISO 21395-1:2020 Optics and photonics — Test method for refractive index of optical glasses — Part 1: Minimum deviation method.
- [3] Конопелько Л. А. Рефрактометрические методы в физико-химических измерениях. — М.: Триумф, — 2020. — 208 с.
- [4] Tilton L. W. Prism Refractometry and Certain Goniometrical Requirements for Precision (Classic Reprint). — Forgotten Books, — 2017. — DOI:10.6028/jres.002.030.
- [5] Tentori D., Lerma J. R. Refractometry by minimum deviation: accuracy analysis // Optical Engineering. — 1990. — №29(2). — P. 160-168. — DOI:10.1117/12.55573.
- [6] Юрин А. И., Вишняков Г. Н., Минаев В. Л. Модифицированные методы призмы для измерения показателя преломления твердых и жидких веществ // Компьютерная оптика. — 2023. — Т. 47. — № 3. — С. 392-397. — DOI:10.18287/2412-6179-CO-1230.
- [7] Юрин А. И., Вишняков Г. Н., Минаев В. Л. Оценка погрешностей измерений показателя преломления модифицированными методами призмы // Измерительная техника. — 2023. — № 3. — С. 28-32. — DOI:10.32446/0368-1025it.2023-3-28-32.

Goniometric methods for measuring the refractive index

G. N. Vishnyakov^{1,2}, A. I. Yurin^{3,1}

¹ All-Russian Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³ HSE University, Moscow, Russia

Goniometric methods of measuring the refractive index of optically transparent materials are considered. A modified method based on the method of minimum deviation is proposed, which allows determining the refractive index of triangular prisms with unknown apex angles. In the proposed method, the angles of light deviation are measured on three faces of the prism, and the refractive index of the material and the prism angles are determined from the solution of a system of equations. The influence of the angular measurement error on the accuracy of the refractive index calculation is estimated.

Keywords: Optics, Refractive index, Goniometry.

Использование вертикально-излучающих диодов в двухдлинноволновой голографической интерферометрии для измерения формы поверхности

И. В. Алексеенко¹, Д. Клаус²

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

²Институт лазерной техники для медицины и оптических измерений, Ульм, Германия

Предлагается метод двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии с применением пары независимых вертикально-излучающих диодов (VCSEL). Диоды являются высокостабилизированными когерентными источниками излучения со слегка отличающимися длинами волн, что позволяет реализовать и использовать рассматриваемый метод для измерения формы объекта. Кроме того, такая система отличается своей устойчивостью к воздействиям окружающей среды, таким как турбулентность воздуха, тепловая нагрузка и/или механические вибрации.

Ключевые слова: Цифровая голографическая интерферометрия, Оптическая метрология.

Цитирование: Алексеенко, И. В. Использование вертикально-излучающих диодов в двухдлинноволновой голографической интерферометрии для измерения формы поверхности / И. В. Алексеенко, Д. Клаус // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 254–256.

Введение

Предложен метод использования вертикально-излучающих диодов для реализации техники двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии. Результаты могут быть использованы в создании измерительных устройств, например, в автомобилестроении, где требуется встроенная измерительная система, позволяющая собирать топографические данные о форме элементов кузова автомобиля на протяжении всего производственного цикла. Таким образом, существует необходимость выполнять высокоскоростные топографические измерения на несогласованных поверхностях (зеркально отражающих и/или диффузно отражающих), что представляет собой серьезную проблему в оптической метрологии.

1. Метод

Определение формы поверхности может быть рассчитано на основе синтетической длины волны и разности фаз для соответствующих длин волн, на которых производится регистрация цифровых голограмм.

Так связь между формой поверхности (высотой профиля), разностью фаз и синтетической длиной волны определяется выражением (1)

$$T = \frac{\Delta\varphi}{4\pi} \lambda_{syn}. \quad (1)$$

где λ_{syn} определяется через разность длин волн, используемых при записи и реконструкции голограмм [1].

Расчет фаз, как правило, осуществляется с применением преобразования Фурье [2].

В качестве источников когерентного излучения использовались два независимых вертикально-излучающих диода (VCSEL) с длиной волны излучения 850 нм с возможностью перестроения по спектральному диапазону на уровне 2 нм.

2. Результаты

Чтобы показать универсальность использования двухдлинноволнового метода при измерении поверхности любого объекта с точки зрения качества его поверхности, был выбран диффузно рассеивающий объект. Образец имеет восемь ступеней с различной высотой 2 мм, 1 мм, 400 мкм, 200 мкм, 100 мкм, 40 мкм, 20 мкм и 10 мкм, как показано на Рисунке. 1. Время экспозиции камеры составляло 35 мс. Такое малое время регистрации голограмм позволяет уменьшить чувствительность системы регистрации к внешним воздействиям. На Рисунке 2 представлена разность фаз -а) и профиль поперечного сечения в 1 мм -б). Высота, измеренная с помощью нашей системы, составляет 0,96 мм для шага в 1 мм.

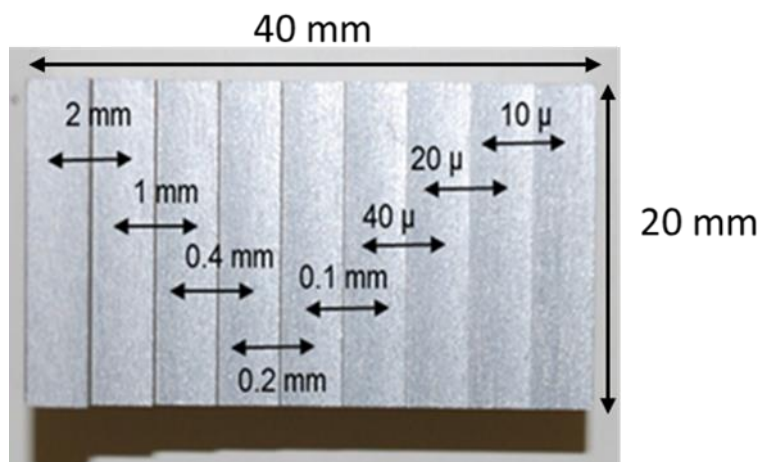
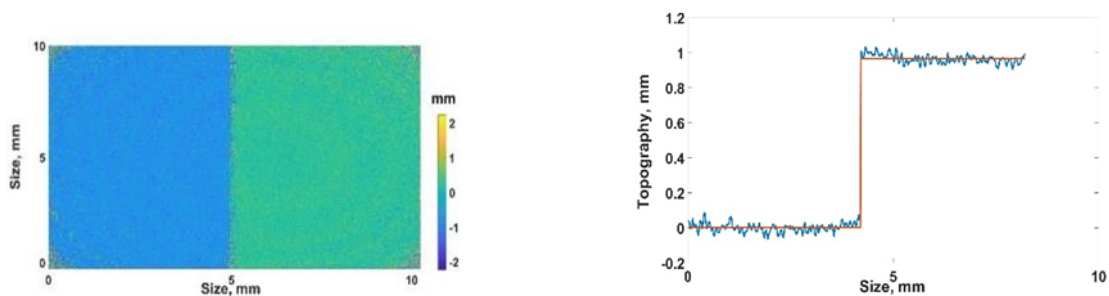


Рис. 1. Образец со ступенчатым профилем



а) Разность фаз

б) Профиль поперечного сечения

Рис. 2. Результат измерения диффузно-отражающего объекта

Заключение

В нашем исследовании мы продемонстрировали метод двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии, в котором использовался спектрально-стабилизированный источник когерентного излучения с двумя вертикально-излучающими диодами (VCSEL). Стабильность такого источника достигается за счет точной стабилизации температуры и тока. Таким образом, метод может применяться для измерений топографии с синтетической длиной волны в миллиметровом диапазоне, сохраняя при этом достаточно высокую погрешность измерений. Установка была реализована компактным, легким и надежным образом с использованием оптических волокон, которые были непосредственно подсоединены к активной зоне излучения каждого VCSEL.

Благодарность

Доклад подготовлен в рамках гранта РФФИ 23-79-00023 «Оптический неразрушающий контроль и диагностика первой стенки ТОКАМАК-реакторов с использованием метода двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии и системы лазерного сканирования».

Список источников

- [1] **Friesem, A. A.** Fringe formation in two-wavelength contour holography/ Friesem, A. A. & Levy, U. // Applied Optics. — 1976. — Vol 15. — P. 3009–3020.
- [2] **Takeda, M.** Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry / Takeda, M., Ina, H. & Kobayashi, S. // Journal of the Optical Society of America. — 1982. — № 76. — P. 156–160.

Implementation of VCSEL in dual wavelength holographic interferometry for topography measurement

I. Alekseenko¹, D. Claus²

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

² Institut fuer Lasertechnologien in der Medizin und Messtechnik, Ulm, Germany

We propose a dual-wavelength digital holographic interferometry method based on a compact dual vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) source. The source simultaneously emits light from two highly stabilized coherent light sources with slightly different wavelengths. A highly stabilized and adjustable current source enables the application of digital holographic dual-wavelength techniques to measure the shape of an object with height steps of a few millimeters. In addition, the dual-wavelength digital holographic system distinguishes itself by its robustness to environmental disturbances such as air turbulence, heat load, and/or mechanical vibrations.

Keywords: Digital holographic interferometry, Optical metrology.

Опыт применения фазоконтрастного видеомикроскопа для исследования качества отверстий и каналов ситалловых корпусов лазерных резонаторов

И. Ю. Цельмина

Раменский приборостроительный завод АО «РПЗ», г. Раменское, МО, Россия

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

В настоящей работе приведены результаты исследования внутренних полостей корпусов лазерных резонаторов с применением фазоконтрастного видеомикроскопа.

Ключевые слова: Фазоконтрастный видеомикроскоп, Ситалл, Лазерный резонатор

Цитирование: **Цельмина, И. Ю.** Опыт применения фазоконтрастного видеомикроскопа для исследования качества отверстий и каналов ситалловых корпусов лазерных резонаторов / И. Ю. Цельмина // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 257–261.

Введение

Базовым конструкционным элементом лазерного резонатора является корпус с системой каналов, заполненных активной средой – смесью изотопов He – Ne. Качество изготовления корпуса играет немаловажную роль для дальнейшей работы изделия в целом. Высокие требования предъявляются как к геометрии, форме и оптической чистоте поверхностей, так и к качеству материала. Оптимальный материал для изготовления корпусов – поликристаллический ситалл типа СО – 115М. Оценкой качества резонаторов является пороговый ток генерации, величина которого не должна превышать 0,3 мА.

Таким образом, процесс изготовления корпусов – это комплексное сочетание применяемых методов и средств измерений, инструментов, приспособлений, оборудования и вспомогательных материалов, а также категорий помещений и классификации специалистов, которое позволяет изготавливать изделия с требуемыми характеристиками. В случае изменения какого – либо фактора на этапе отработанного процесса возможно возникновение нежелательных изменений в характеристиках данного типа изделий, требующих исследования их влияния на дальнейшие параметры сборки и нахождения истинной причины возникновения этих изменений для их исключения.

Для получения заданных параметров, а также для отработки технологических процессов изготовления изделий необходимо применять интерференционные и микроскопические методы и соответствующие средства измерений.

1. Эксперимент

Были исследованы поверхности внутренних полостей корпусов резонаторов, изготовленных с применением двух различных алмазно-абразивных инструментов: гальваническим однослойным – тип 1 и, изготовленный методом вакуумного жидкостного спекания

металлизированных алмазных порошков – тип 2, с одинаковым режимом обработки. Так же исследовано влияние профиля поверхности, созданного каждым типом инструмента, на дальнейшую работу резонатора.

Исследования полученных поверхностей отверстий выполняли на заключительном этапе предварительной обработки резонатора, перед жидкостным травлением внутренних полостей с применением фазоконтрастного видеомикроскопа, с последующими химическим травлением, затем полировкой внешних прецизионных поверхностей. На образцах, обработанных инструментом типа 1, было обнаружено повреждение слоя материала вдоль стенок некоторых каналов и отверстий, представленных на рисунке 1. Исследуемое изделие устанавливалось на моторизованном предметном столике с перпендикулярным расположением осей отверстий к оптической оси средства измерения. Так как отверстия расположены в теле прозрачного объекта, то представленные на рисунках в настоящей работе изображения, рассматриваются через толщину прозрачного материала.

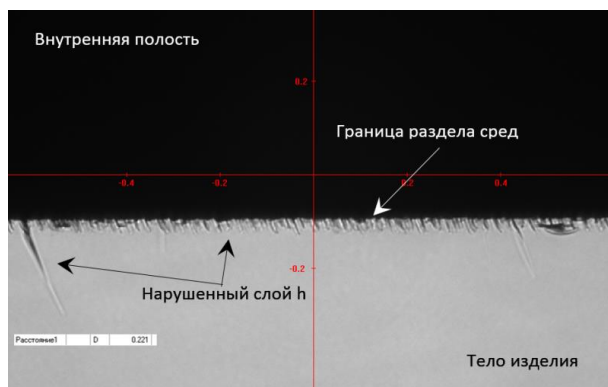
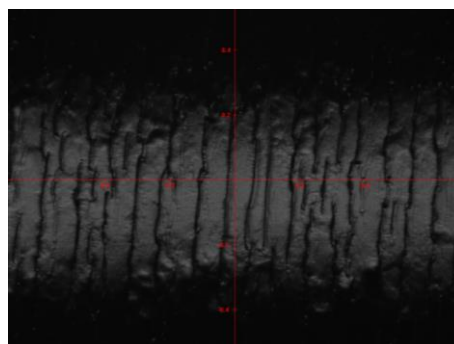
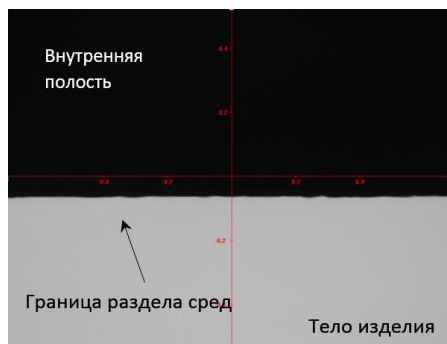


Рис. 1. Поврежденный слой материала вдоль стенок отверстий, с максимальной глубиной 0,221 мм., среднее значение по глубине, с исключением максимальных пиков, составляет 0,044 мм., увеличение 70*

Для дальнейшего исследования корпуса резонаторов отправили на жидкостное травление с эффектом полирования. Затем выполнили повторное исследование на фазоконтрастном видеомикроскопе. Полученные результаты представлены на рисунке 2.



а) форма фрагмента границы раздела сред, 70* б) фронтальный вид фрагмента стенки отверстия, 185*

Рис. 2. Внешний вид фрагмента отверстий с дефектами после жидкостного травления с эффектом полирования

Из рисунка 2 а) видно, что в большинстве случаев максимальные глубинные дефекты устранены травлением. Однако, граница раздела сред представляет собой волнистую форму, а на фронтальном изображении 2 б) отверстия просматриваются оплавленные «рубцы» от внутренних микротрещин. По рисункам 1 и 2б) можно хорошо представить распределение повреждений в толще материала вдоль стенок отверстий. При этом, нужно заметить, что не на всех отверстиях, с применением инструмента типа 1 наблюдаются такие явления.

Для более наглядного представления различий формы поверхностей стенок отверстий, на рисунке 3 приведен пример фрагмента стенок отверстий до жидкостного травления без видимых дефектов (инструмент типа 2) и с аналогичными дефектами (инструмент типа 1), на одном и том же корпусе.

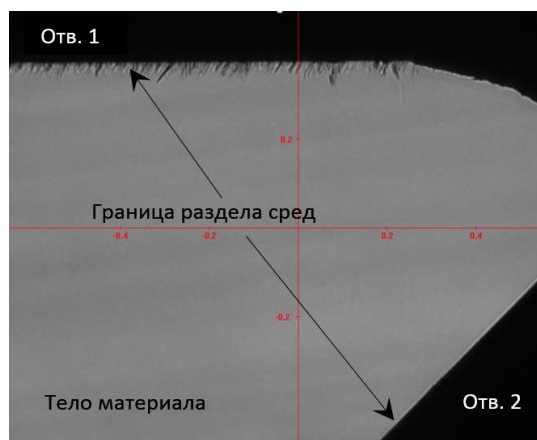
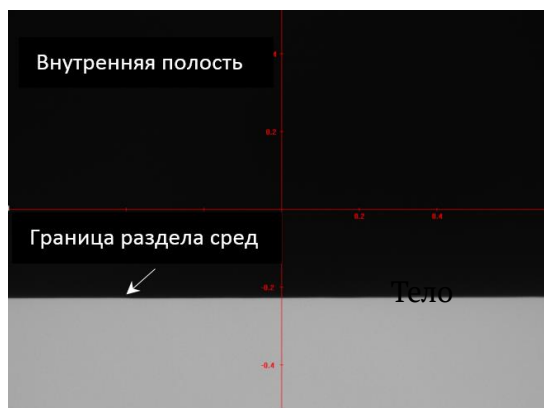
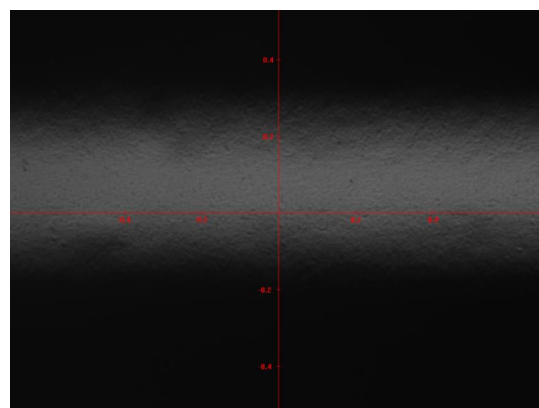


Рис. 3. Внешний вид фрагмента отверстий с дефектами и без перед жидкостным травлением, 70°. На образце также просматриваются свилевые потоки.

На рисунке 4 приведен пример фрагмента отверстий после жидкостного травления, на котором не обнаружены описанные выше дефекты перед травлением во время исследования на фазоконтрастном видеомикроскопе. Отверстия выполнены с применением инструмента типа 2.



а) фрагмент формы границы раздела сред, 70°



б) фронтальный вид фрагмента стенки отверстия, 185°

Рис. 4. Внешний вид фрагмента отверстий без обнаруженных дефектов после жидкостного травления

По изображениям на рисунке 4 хорошо видно, что граница раздела сред представляет собой ровную четкую линию 4 а), а на фронтальном изображении 4 б) поверхность гладкая, с отсутствием следов повреждения материала.

При дальнейшем исследовании поверхностей на панкратическом стереоскопическом микроскопе при увеличениях (15 – 25)* наблюдалось следующее:

- стенки отверстий, изготовленные с применением инструмента типа 1, не являются полностью прозрачными и также четко просматривается «рифление» поверхности. Однако, следов недотравов – наличие мата, не обнаружилось;

- стенки отверстий, изготовленные с применением инструмента типа 2, прозрачные и ровные.

Для сравнения внешний вид «ровных» и «рифленых» отверстий, представлен на рисунке 5. Изображение объекта выполнено на том же видеомикроскопе.

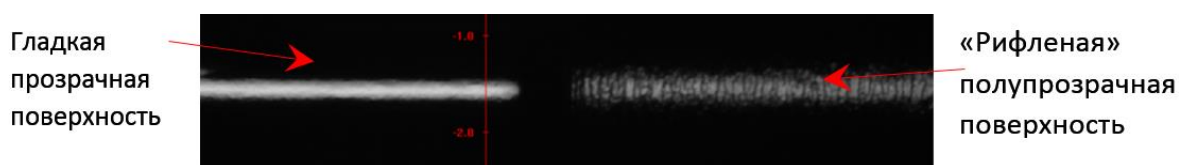


Рис. 5. Внешний вид стенок отверстий после жидкостного травления с применение инструментов типа 1 и типа 2, 70*.

Корпуса с наличием вышеописанных особенностей отправили на последующие этапы работ для дальнейших исследований, с целью определения влияния данного типа дефекта на работу изделия.

2. Результат

После выполнения сборки изделия и проведения циклов вакуумно – технологической отработки были произведены окончательные измерения порогового тока генерации резонаторов. Результаты по пороговым токам генерации на 10 исследуемых приборах с указанием применяемого типа инструмента при изготовлении отверстий и каналов, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерений

№ прибора	Пороговый ток генерации, мА	Тип инструмента	№ прибора	Пороговый ток генерации, мА	Тип инструмента
1	0,25	Тип 1/ тип 2	6	0,27	Тип 2
2	0,24	Тип 1/тип 2	7	0,22	Тип 2
3	0,25	Тип 1	8	0,2	Тип 2
4	0,25	Тип 1	9	0,22	Тип 1/ Тип 2
5	0,21	Тип 1	10	0,25	Тип 1/ Тип 2

Заключение

В настоящей работе представлено исследование поверхностей внутренних полостей лазерного резонатора, полученных двумя типами алмазно-абразивного инструмента, с применением фазоконтрастного видеомикроскопа. Также проведена работа с предоставлением полученных данных по исследованию влияния качества обработки поверхностей отверстий на работу лазерного резонатора в целом. Согласно полученным результатам можно сделать нижеперечисленные выводы:

- применение инструмента типа 1, в отличие от инструмента типа 2, приводит к образованию дефектов в приповерхностном слое материала, достигающих максимальной величины от 0,220 мм до 0,315 мм и может приводить к выкрашиванию материала во время обработки (см. рисунок 1);

- дефектный слой, сформированный инструментом типа 1, удаляется химическим травлением, с образованием волнообразного контура на границе сред и оплавлением «рубцов» (см. рисунок 2);

- полученный результат, с применением инструмента типа 1, усложняет проведение проверки внутренних полостей изделия из-за своей формы поверхности и отсутствия полной прозрачности. Однако, на качество химической очистки после оптической обработки поверхностей влияния не оказывает;

- также, исходя из результатов, приведенных в таблице 1, можно сделать вывод, что на работу конкретного изделия, формируемый профиль поверхности внутренних полостей в представленном размерном соотношении влияния не оказывает.

- выбор типа инструмента может определяться соотношением цены, доступности и производительностью.

Experience in the use of a phase-contrast video microscope for studying the quality of holes and channels of sitall housings of laser resonators

I. Y. Tselmina^{1,2}

¹Ramenskoye instrument – Marking Plant of JSC «RPZ»

²Bauman Moscow State Technical University

This paper presents studies of the internal cavities of resonator housings using measuring instruments such as a phase-contrast video microscope, with the results of subsequent assembly of laser resonators.

Keywords: Phase-contrast video microscope, Sitall, Laser Resonator.

Система прямого монохроматического контроля толщины тонкопленочных интерференционных покрытий, наносимых в вакууме

Ю. О. Просовский¹, О. Ф. Просовский¹, А. Н. Исамов¹, А. Ю. Буднев,¹ В. А. Смольянинов¹,
Д. Г. Денисов²

¹ АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина»,
Обнинск, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Разработан метод прямого монохроматического контроля толщины наносимых оптических покрытий на основе монохроматора собственной конструкции. Показана структурная схема монохроматора. Показан принцип работы системы контроля в целом. Выделены ключевые особенности данного метода.

Ключевые слова: Оптика, оптические покрытия, система контроля.

Цитирование: **Просовский, Ю. О.** Система прямого монохроматического контроля толщины тонкопленочных интерференционных покрытий, наносимых в вакууме / Ю. О. Просовский, О. Ф. Просовский, А. Н. Исамов, А. Ю. Буднев, В. А. Смольянинов, Д. Г. Денисов // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 262–265.

Введение

Оптические покрытия играют ключевую роль в современной оптической промышленности. Без них невозможно представить нашу жизнь, ведь они охватывают абсолютно все сферы. Любое оптическое покрытие формируется благодаря совокупности множества факторов. Ключевыми являются: оптические постоянные подложки и пленкообразующих материалов, используемые методы нанесения и контроля оптических покрытий, оптическая конструкция (число и толщина слоев) наносимого покрытия [1]. Совокупность всех этих факторов формирует современную номенклатуру оптических покрытий.

Ключевым элементом, позволяющим получить качественное оптическое покрытие, является система контроля. Каким бы совершенным не было бы вакуумное напылительное оборудование невозможно получить качественное покрытие, если отсутствует возможность его контролировать. На сегодняшний день можно выделить две основных группы реализации систем контроля – системы прямого и системы косвенного контроля [2].

Система прямого монохроматического контроля

Разрабатываемая система контроля имеет классическое устройство [1, 2]. Основной особенностью систем прямого контроля является выполнение измерения непосредственно на изделии, закрепленном на подложкодержателе (рисунок 1).

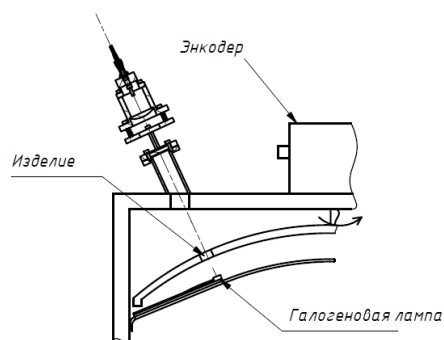


Рис. 1. Структурная схема системы прямого оптического контроля.

Разрабатываемый монохроматор на основе интерференционных светофильтров состоит из набора цветных стекол (для подавления «хвостов» в УФ и ИК областях спектра) и из фильтра Фабри-перо, выделяющего требуемую ширину спектра излучения, необходимую для осуществления контроля [3]. Структурная схема приведена на рисунке 2.

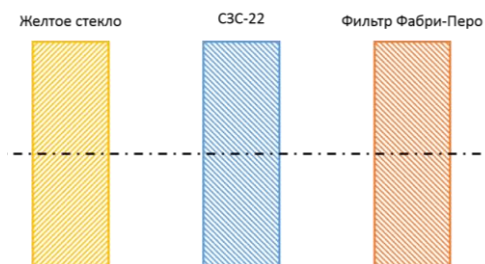


Рис. 2. Структурная схема монохроматора.

При создании высококачественного монохроматора на узкополосном селективном светофильтре особое внимание необходимо уделить непосредственно фильтру Фабри-Перо. При его создании необходимо стремиться к достижению необходимой ширины на $\lambda_{0,5}$ (в нашем случае 3нм) и максимальной ширины подавления излучения с $OD > 4$. При создании конструкции селективного светофильтра мы остановились на мультикэвити 3-го порядка. Этот фильтр был смоделирован в программе OptiLayer и представляет собой оптическую конструкцию из 41-го слоя пары материалов Nb_2O_5 и SiO_2 . На рисунке 3 показан график спектральной зависимости полностью готового интерференционного монохроматора.

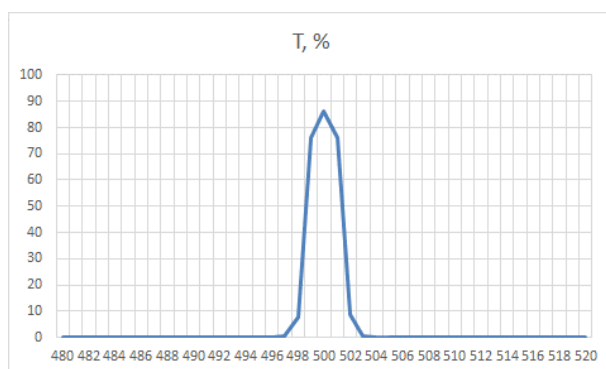


Рис. 3. Спектральная характеристика пропускания готового монохроматора

Результаты испытаний системы контроля

Изготовленный интерференционный монохроматор был использован для проведения измерений на длине волны 500 нм, спектральное разрешение составило 3 нм. Отношение сигнал/шум <0,02 %, дрейф показаний в течении 12 часов < 0,6 %. Испытания проводились при скорости вращения подложкодержателя 30 об/мин., длительность времени измерения составляла 40 мс.

Проводились исследования линейности измерений оптической системы контроля в диапазоне величины сигнала, соответствующего пропусканию 10-100%. Исследование линейности основывалось на сравнительном анализе значений величины пропускания, полученных с помощью системы оптического контроля на длине волны 500нм и значений величины пропускания на длине волны 500нм того же образца, измеренные на спектрофотометре Cary-300. В таблице 1 показаны результаты сравнительных измерений.

Таблица 1. Сравнение измерений спектрофотометра и спроектированного монохроматора.

Cary-300, T, %	10,57	23,38	58,74	91,39
Система контроля, T, %	10,61	23,41	58,72	91,43

Выводы

Результаты работы дают положительный ответ на целесообразность продолжения проекта создания оптической системы прямого монохроматического контроля для вакуумной установки. Спроектированный монохроматор обладает точностными характеристиками, не уступающими монохроматорам на дифракционных решетках, но при этом куда проще и дешевле в производстве. Проведена проверка состоятельности идеи использования узкополосных светофильтров для получения монохроматического излучения и использования его для системы оптического контроля напыляемых тонкопленочных покрытий. Следующим шагом будет создание программного обеспечения для интеграции полученного нами измерительного устройства в программу управления процессом напыления установки и создания интерфейса связи системы контроля с программой OptiLayer.

Список литературы

- [1] Денисов Д.Г., Просовский Ю.О., Просовский О.Ф., Буднев А.Ю. Современные методы формирования прецизионных оптических покрытий // Контенант, – т. 9, – №1, – с.1-7, 2020.
- [2] Просовский Ю.О., Просовский О.Ф., Буднев А.Ю., Денисов Д.Г., Барышников Н.В., Современная система прямого оптического широкополосного контроля толщины напыляемых оптических покрытий // Светотехника №4, - с. 51-54, 2020.
- [3] Просовский Ю.О., Денисов Д.Г., Просовский О.Ф., Буднев А.Ю. Direct monochromatic optic control system of the thickness of thin-film interference coatings applied in vacuum // Proceedings of SPIE, - paper № 110563Z, 2019.

Direct monochromatic optic control system of the thickness of thin film interference coatings applied in vacuum

*Y. O. Prosovskii¹, O. F. Prosovskii¹, A. N. Isamov¹, A. Y. Budnev,¹ V. A. Smolyaninov¹,
D. G. Denisov²*

¹ ORPE «Technologiya», Obninsk, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

A new method of direct monochromatic control for thin-films coating has been developed. The block diagram of the monochromator is shown. The principle of operation of the control system as a whole is shown. The key features of this method are discussed.

Keywords: Optics, Optical coatings, Control system.

Современные методы решения проблем и задач создания тонкопленочных структур для различных приложений конструкционной и приборной оптики

А. Н. Исамов, О. Ф. Просовский, Ю. О. Просовский, А. Ю. Буднев, В. А. Смольянинов

АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина»,
Обнинск, Россия

В данной работе рассмотрены современные методы решения проблем и задач, возникающих при создании тонкопленочных структур. Подробно рассмотрены современные технологии получения оптических покрытий. Проанализированы ключевые особенности каждого метода. Показаны возможности каждой из технологий, а также приведены практические результаты применения на реальном производстве.

Ключевые слова: Оптика, оптические покрытия, вакуумное напыление.

Цитирование: Исамов, А. Н. Современные методы решения проблем и задач создания тонкопленочных структур для различных приложений конструкционной и приборной оптики / А. Н. Исамов, О. Ф. Просовский, Ю. О. Просовский, А. Ю. Буднев, В. А. Смольянинов // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 266–269.

Введение

В современной промышленности сложно найти изделия конструкционной и приборной оптики, которые изготавливаются без использования тех или других покрытий на их поверхности. Прочно вошли в жизнь покрытия, модифицирующие поверхность изделий. Модификация поверхности позволяет сделать изделие более устойчивым к воздействию внешних факторов, на пример истиранию, воздействию агрессивных веществ, улучшить оптические свойства (просветление), придать принципиально новые оптические свойства – поляризация излучения, фильтрация излучения и т.д. В настоящее время существует множество методов нанесения оптических покрытий – электронно-лучевое испарение, магнетронное распыление, ионное распыление, термическое испарение и др. Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и недостатками, направлен на решение определенного рода задач по напылению оптических покрытий. В рамках данной работы рассмотрены технологии создания оптических покрытий, применяющиеся для решения различных задач на производственной площадке АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» в г. Обнинске

Электронно-лучевое испарение (ЭЛИ)

Первый метод, который применяется в нашей лаборатории – метод ЭЛИ. ЭЛИ основан на физическом принципе превращения кинетической энергии ускоренного пучка электронов в тепловую. Электронно-лучевой испаритель состоит из катода, эмитирующего в результате термоэмиссии электронное облако, которое вытягивается в электронный пучок ускоряющим

напряжением и фокусируется в пятно необходимой конфигурации магнитной фокусирующей системой [1]. На рисунке 1 приведена структурная схема технологии ЭЛИ.

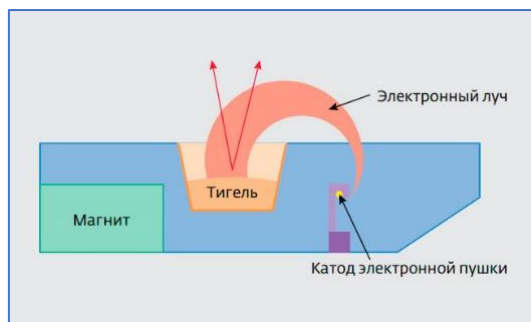


Рис. 1. Принцип ЭЛИ

Метод ЭЛИ благодаря возможности сфокусировать луч в пятно диаметром 3мм позволяет получить крайне высокую плотность энергии на единицу площади – 10 и более kW/cm^2 . Это позволяет испарять вещества с температурой плавления 2500°C и выше. Использование водоохлаждаемого медного тигля позволяет исключить химическую реакцию материала тигля и испаряемого вещества- как чистых металлов так и химических соединений.

Неотъемлемым атрибутом современного напылительного оборудования является ионный источник ассистирования процесса напыления тонкопленочного покрытия. Благодаря процессу бомбардировки тяжелыми ионами инертного газа аргона или молекулами кислорода (реактивного газа) кинетически трамбует только осевшие (еще подвижные в поиске активного центра конденсации) на подложку атомы осаждаемого вещества. В результате удастся получить покрытия с плотностью упаковки $Q=96-98\%$ [2].

Плотность упаковки:

$$Q = \frac{V_{sk}}{V_{sk} + V_{por}} \quad (1)$$

где V_{sk} — объем скелета осажденной пленки; V_{por} — объем пор.

Наличие пор в покрытии приводит к тому, что в процессе эксплуатации в них может сконденсироваться вода, что приведет к изменению спектральной характеристики светофильтра, а благодаря ионному ассистированию удастся получить покрытие без пор (рисунок 2). Также, важным является и тот факт, что кроме уплотнения напыляемого покрытия происходит его доокисление и удастся получать покрытия с нулевым коэффициентом поглощения. На рисунке 2 показан принцип процесса ионного ассистирования.

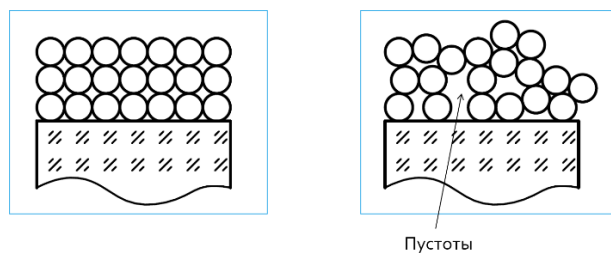


Рис. 2. Структура покрытия с ионным ассистированием (слева) и без него (справа)

Магнетронное распыление

Еще одним методом напыления оптического покрытия является метод магнетронного распыления. Магнетронное распыление — технология нанесения тонких плёнок на подложку с помощью катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда — диодного разряда в скрещённых полях [3].

Применение дуальной магнетронной распылительной системы позволяет получить крайне высокостабильный технологический источник нанесения тонких пленок в вакууме. Технической особенностью дуальной магнетронной системы является применение рядом установленных двух магнетронов и питание их среднечастотным напряжением. При этом в один полупериод мишень одного магнетрона является распыляемым катодом, а мишень другого — анодом. В следующий полупериод — мишень, бывшая катодом становится анодом, а вторая — распыляемым катодом [4]. Принцип работы дуального магнетрона показан на рисунке 3. Данный принцип напыления позволяет снизить до минимума дуговые разряды в ходе процесса при обеспечении концентрации реактивного газа, обеспечивающей нанесение покрытий с нулевым поглощением.

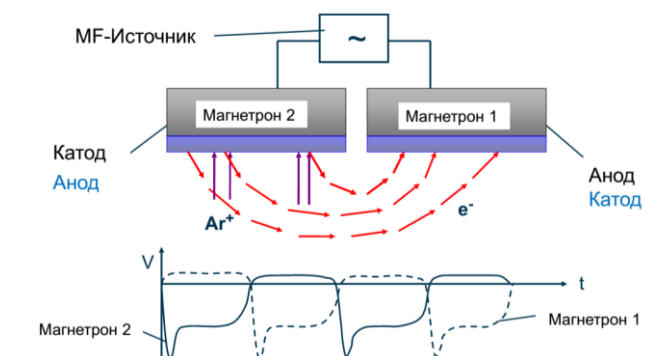


Рис. 3. Принцип напыления с помощью дуального магнетрона

Выводы

Таким образом, в данной работе были рассмотрены два основных метода нанесения оптических покрытий, применение которых позволяет решать широкий спектр задач для нужд современной оптической промышленности.

Для метода ЭЛИ используется комплекс, включающий в себя систему прямого контроля толщины наносимого оптического покрытия (позволяющий вести процессы в автоматическом режиме, без участия оператора, а также нивелировать ошибки уже

нанесенных слоев оптической конструкции); ионное ассистирование процесса, позволяющее получать качественные плотные многослойные интерференционные структуры, а также средства САПР, позволяющие рассчитывать и оптимизировать оптическую конструкцию, исходя из технологических возможностей вакуумного оборудования и применяемых на нем пленкообразующих материалов. Оптимизация оптической конструкции позволяет находить баланс между целевой функцией и простотой напыляемой конструкции, что существенным образом повышает воспроизводимость оптический покрытий на производстве. Технология ЭЛИ применяется для производства негабаритных изделий, имеющая, к тому же высокую скорость напыления.

Технология магнетронного распыления также включает в себя комплекс технологий и систем, включающий в себя систему контроля толщины наносимых оптических покрытий, ионное ассистирование процесса и средства САПР. Данный метод обеспечивает высокую равномерность покрытия по толщине вдоль всей длины изделия, поэтому наиболее широкое применение он получил для производства крупногабаритных оптических деталейю

Применение указанных методов на производственной площадке АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» позволяет получать воспроизводимые, стабильные от процесса к процессу сложные (с числом слоев >50) интерференционные, защитные и функциональные покрытия.

Список литературы

- [1] Мовчан Б. А., Тутов Н. Д. Электронно-лучевое испарение и осаждение из паровой фазы материалов в вакууме // Научно-технический журнал. – 2009. – С. 12.
- [2] Kaufman H. R., Harper J. M. E. Ion-assist applications of broad-beam ion sources //Advances in Thin Film Coatings for Optical Applications. – SPIE, 2004. – Т. 5527. – С. 50-68.
- [3] Jakobs S. et al. Characterization of metal-oxide thin films deposited by plasma-assisted reactive magnetron sputtering //Chinese Optics Letters. – 2010. – Т. 8. – №. s1. – С. 73-77.
- [4] Somkhunthot W. et al. Bipolar pulsed-DC power supply for magnetron sputtering and thin films synthesis //Elektrika Journal of Electrical Engineering. – 2007. – Т. 9. – №. 2. – С. 20-26.

Modern methods for solving problems and creating thin-film structures for various applications in structural and instrumental optics

A. N. Isamov, O. F. Prosovskii, Y. O. Prosovskii, A. Y. Budnev, V. A. Smolyaninov
ORPE «Technologiya», Obninsk, Russia

In this paper, we consider modern methods for solving problems when creating thin-film structures. Modern technologies for obtaining optical coatings were considered in detail. The key features of each method were analyzed. The possibilities of each of the technologies were shown. Practical results of application in real production were shown.

Keywords: Optics, Optical coatings, Vacuum deposition.

Оценка фазовых шумов лазерного гетеродинного интерферометра для гравитационно-волновой антенны

Е. А. Лавров, С. С. Донченко, Д. А. Соколов

ФГУП «ВНИИФТРИ», р. п. Менделеево, Россия

В работе описаны принципы построения лазерного гетеродинного интерферометра, измеряющего относительные перемещения пробных масс в проекте космической гравитационно-волновой антенны. Представлены результаты по оценке и исследованию основных источников шума: флуктуации частоты лазерного излучателя, драйверов акустооптических модуляторов, фотодетекторов, температурных флуктуаций и т.д. Наибольший вклад в шумы макета интерферометра внесли температурные флуктуации. Суммарный расчётный шумовой бюджет не превышает 20 пм в диапазоне частот от 2 до 10 Гц. Сформулированы предложения по модернизации макета для уменьшения уровня шумов до требуемого уровня (менее 30 пм) во всем частотном диапазоне от 100 мГц до 10 Гц.

Ключевые слова: Межспутниковый лазерный интерферометр, Гетеродинный интерферометр, Гравитационные волны, Шумы интерферометра.

Цитирование: Лавров, Е. А. Оценка фазовых шумов лазерного гетеродинного интерферометра для гравитационно-волновой антенны / Е. А. Лавров, С. С. Донченко, Д. А. Соколов // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 270–272.

Введение

В работе [1] был предложен проект российской космической гравитационно-волновой антенны (ГВА) на геоцентрической орбите Земли ГЛОНАСС под названием SOIGA. Для опробования основных технических решений и полунатурного макетирования разработан макет гетеродинного интерферометра. Проведена оценка основных источников шума при измерении относительных перемещений пробных масс и выполнимости требований по чувствительности таких измерений.

1. Проект гравитационно-волновой антенны SOIGA

Основным измерительным устройством ГВА является лазерный интерферометр. На каждом из космических аппаратов (КА) размещается интерферометр Майкельсона, пробные массы на двух других КА являются его оконечными зеркалами. При прохождении гравитационной волны через плоскость антенны SOIGA изменяется геометрия интерферометра, а именно, длина каждого плеча интерферометра. Изменения расстояния между поверхностями пробных масс определяются путём измерения задержек фазы распространения лазерных лучей, прошедших через плечи интерферометра.

2. Наземный макет бортового интерферометра

Для исследования основных узлов ГВА был разработан наземный макет лазерного гетеродинного интерферометра, принцип работы которого приведён на рис. 1а. С помощью

макета решаются следующие задачи: оценка шумового бюджета и вклада основных источников шумов; оценка чувствительности и поиск путей достижения требуемых точностных характеристик при измерении приращений расстояния между пробными массами.

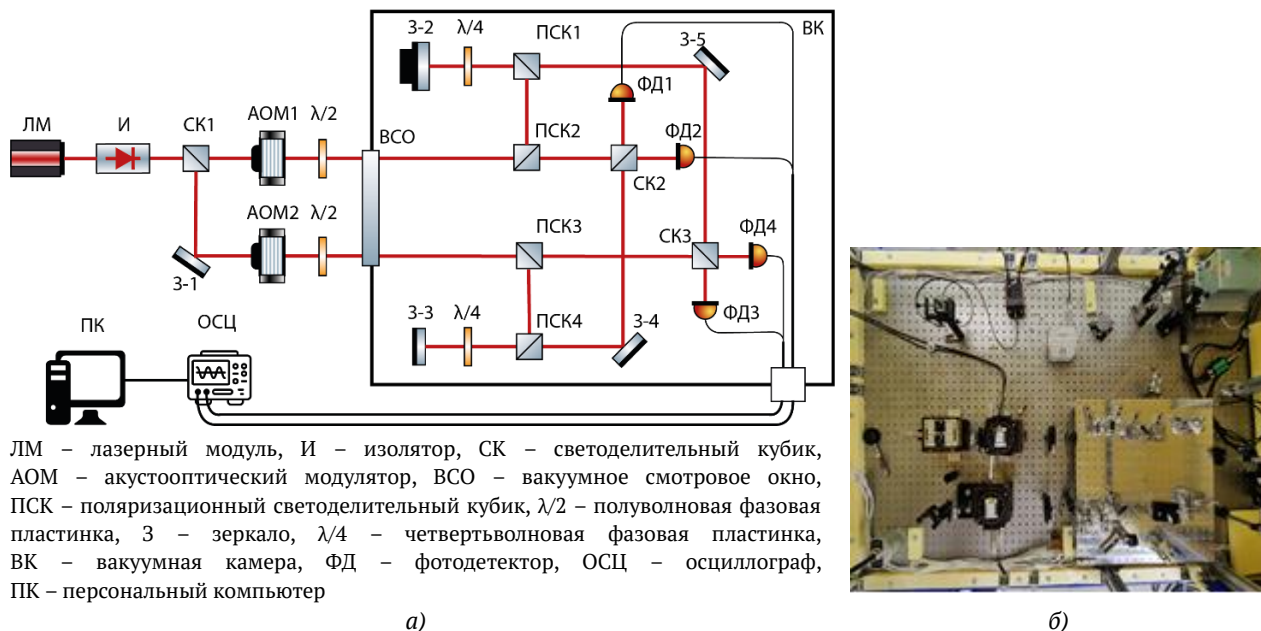


Рис. 1. а) Функциональная схема макета бортового интерферометра; б) внешний вид макета интерферометра

3. Оценка фазовых шумов лазерного гетеродинного интерферометра для гравитационно-волновой антенны

Основными источниками шумов лазерного гетеродинного интерферометра для гравитационно-волновой антенны являются: флуктуации частоты лазерного излучателя; драйверы акустооптических модуляторов; температурные флуктуации, акустические шумы и вибрации; шумы в фотодетекторах; шумы алгоритма определения разности фаз. Суммарный расчётный шумовой бюджет не превышает 20 пм в частотном диапазоне от 2 до 10 Гц.

Уменьшение вклада флуктуаций температуры возможно при использовании материалов с ультранизким коэффициентом температурного расширения.

Уменьшение влияния акустических, температурных и вибрационных шумов на работу интерферометра возможно при размещении макета в вакуумной камере на виброизоляционном подвесе.

Заключение

В работе описаны принципы построения лазерного гетеродинного интерферометра, измеряющего относительные перемещения пробных масс в проекте космической гравитационно-волновой антенны SOIGA. Приведены результаты исследований основных источников шумов. Сформулированы предложения по модернизации макета для

уменьшения уровня шумов до требуемого уровня (менее 30 пм) во всем частотном диапазоне от 100 мГц до 10 Гц.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11022\20.

Список источников

- [1] **Пустовойт, В. И.** Концепция создания космической лазерной гравитационной антенны на геоцентрической орбите ГЛОНАСС «SOIGA» / В. И. Пустовойт, С. И. Донченко, О. В. Денисенко, В. Ф. Фатеев // Альманах современной метрологии — 2020. — № 1(21). — С. 27–49.

Phase noise evaluation of the laser heterodyne interferometer for the gravitational wave antenna

E. A. Lavrov, S. S. Donchenko, D. A. Sokolov

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Russia

The paper describes the principles of constructing a laser heterodyne interferometer for measurement of the relative displacements of test masses in the space gravitational wave antenna project. Results of evaluation and investigation of main noise sources such as frequency fluctuations of the laser, drivers of acousto-optic modulators, photodetectors, temperature fluctuations, etc are presented. The greatest contribution to the interferometer layout noise was made by temperature fluctuations. The total calculated noise budget does not exceed 20 pm in frequency range from 2 to 10 Hz. The proposals for reducing the layout's noise to the required level (less than 30 pm) over the entire frequency range from 100 mHz to 10 Hz are given.

Keywords: Intersatellite laser interferometer, Heterodyne interferometer, Gravitational waves, Interferometer noises.

Гиперхроматические элементы для волоконных конфокальных измерительных систем

М. А. Завьялова¹, П. С. Завьялов^{1,2}, Д. А. Коверзнев^{1,2}, Д. Р. Хакимов¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия

Для измерения смещений и микропрофиля поверхности с малым коэффициентом отражения предложена концепция волоконной конфокальной системы на основе суперлюминесцентного диода (ширина спектра 40 нм) и гибридного гиперхроматического объектива (ГХО). Смещение и перепад высот объекта в такой системе определяется измерением спектра отраженного от поверхности излучения с выделением доминирующей длины волны. В результате программного моделирования показано, что ошибка волнового фронта, формируемого ГХО, не должна превышать $\Delta W \leq \lambda/10$. Теоретически и экспериментально показано, что в ГХО при использовании линз с различным фокусным расстоянием возможна компенсация сферической аберрации путем изменения расстояния между дифракционным оптическим элементом и одиночной линзой. Разработанная система имеет чувствительность к смещениям образца из прозрачного стекла 0,1 мкм и менее.

Ключевые слова: Оптика, Дифракционные оптические элементы, Гиперхроматические объективы, Конфокальный метод, Метод хроматического кодирования.

Цитирование: Завьялова, М. А. Гиперхроматические элементы для волоконных конфокальных измерительных систем / М. А. Завьялова, П. С. Завьялов, Д. А. Коверзнев, Д. Р. Хакимов // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 273–280.

Введение

Волоконные конфокальные измерительные системы (далее – ВКИС) на основе хроматического кодирования являются бесконтактными устройствами для высокоточных измерений. Их ключевой особенностью является использование дисперсионных или дифракционных свойств оптических элементов, когда фокусировка света осуществляется не в одной точке, а с разделением по длине волны на разных расстояниях. Так, при использовании дифракционного оптического элемента (далее – ДОЭ) фокус для света с более короткими длинами волн находится на большем расстоянии от элемента чем фокус более длинноволновой части спектра. Этот принцип позволяет кодировать разные расстояния до поверхности разным цветом. ВКИС тчик не требует какого-либо сканирования вдоль оптической оси благодаря увеличенному по сравнению с глубиной фокуса диапазону измерения. Для пространственного ограничения фокусировки в области изображения используется конфокальный метод, при котором происходит фильтрация отраженного света диафрагмой с малым диаметром, а в случае волоконного исполнения ВКИС – торцом волокна.

Концепции построения ВКИС с использованием многомодового волоконно-оптического ответвителя, различных источников излучения и гиперхроматических элементов встречаются в научной литературе довольно часто [1, 2]. Кроме того, в более ранних работах авторов [3, 4] описаны различные модификации таких систем и исследованы их точностные характеристики. Целью настоящего исследования является разработка ВКИС для измерения смещений и микропрофилирования поверхности оптических прозрачных сред с малым коэффициентом отражения.

В данной работе в качестве источника света использовался волоконный суперлюминесцентный светодиод [5], который позволяет существенно увеличить уровень сигнала по сравнению с обычно используемой галогенной лампой. Для такого источника был рассчитан гиперхроматический объектив (ГХО), в котором в качестве спектрального элемента используется ДОЭ. Суперлюминесцентные светодиоды имеют ширину спектра около $\Delta\lambda = 20 - 40$ нм, поэтому применение дифракционной оптики для таких источников света является практически единственным вариантом создания ГХО с протяженным хроматическим участком Δz .

1. Расчет гиперхроматического объектива

Как известно, для одиночного ДОЭ с фокусным расстоянием f справедливо следующее соотношение:

$$\frac{\Delta z}{f'} \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (1)$$

Из этого соотношения следует, что в случае использования суперлюминесцентного светодиода а с $\lambda = 780 \pm 20$ нм можно получить хроматический отрезок порядка 5 % от f .

Недостатком использования одиночного ДОЭ является то, что регулировать хроматический участок Δz (а значит и диапазон измерения) можно только изменением фокусного расстояния ДОЭ, а это не всегда удобно, так как при этом также необходимо изменять апертуру ДОЭ и габариты всей ВКИС. Поэтому совместно с ДОЭ можно использовать одиночные линзы с разными фокусными расстояниями f_l . При этом линза ввиду того, что спектральный диапазон достаточно мал $\Delta\lambda \sim 20 - 40$ нм, не вносит существенных искажений в спектральное разложение, так как хроматизм ДОЭ существенно выше хроматизма линзы. Оптическая сила всего ГХО:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_{\text{ДОЭ}}} + \frac{1}{f'_l} \quad (2)$$

Ниже приведен пример расчет такого гибридного ГХО, в котором для сжатия спектрального отрезка используется простая плоско-выпуклая линза с $f'_l = 22$ мм. Общее фокусное расстояние: $f = 12$ мм, хроматический отрезок $\Delta z = 300$ мкм.

Существенно, что расчет ДОЭ для гибридного объектива велся с учетом сферической aberrации одиночной линзы. В фазовую функцию ДОЭ вносилась добавка, компенсирующая сферическую aberrацию линзы ΔW_s .

Наличие сферической aberrации приводит к тому, что для одной и той же длины волны лучи из центральной и краевой частей объектива фокусируются в разных точках на оптической оси. Таким образом нарушается принцип конфокальности (отсутствует острая фокусировка). Спектральный сигнал на спектрометре будет значительно расширяться, что приведет к снижению чувствительности измерений.

На рисунке 1 приведены рассчитанные спектральные сигналы ВКИС при разных значениях некомпенсированной сферической aberrации ΔW_s .

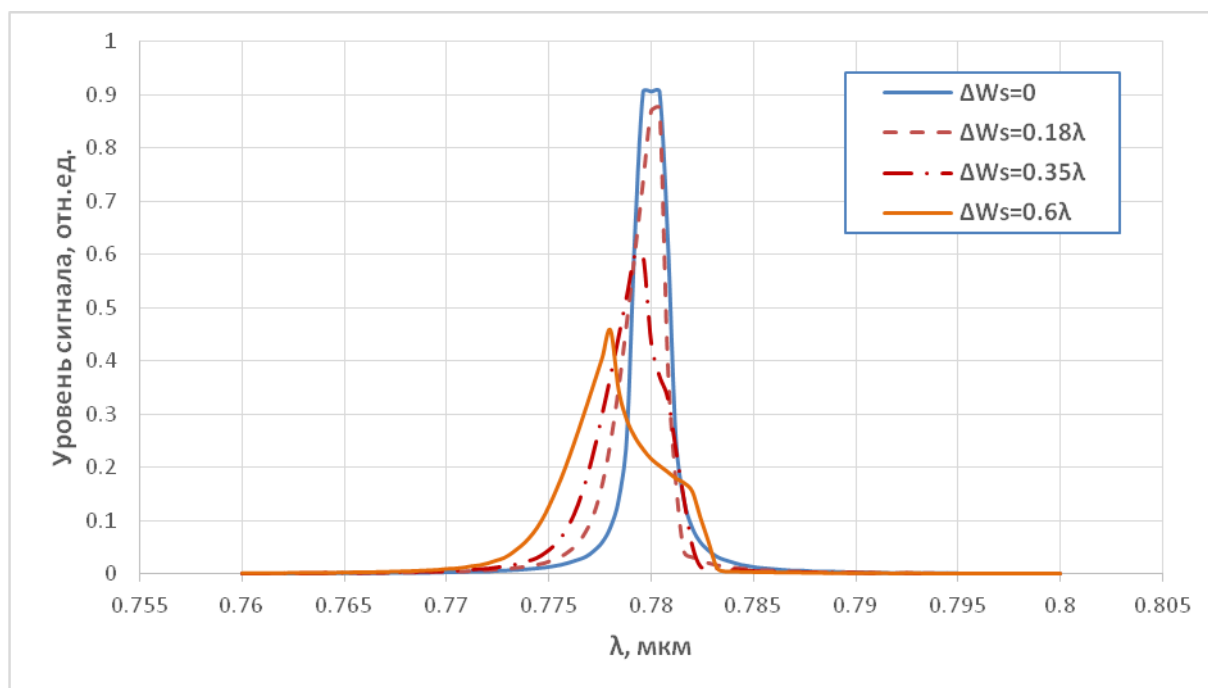


Рис. 1. Результаты моделирования спектральных сигналов волоконной конфокальной измерительной системы при наличии сферической aberrации ΔW_s

Как можно видеть из графиков на рисунке 1 помимо значительного уширения спектрального пика сферическая aberrация также приводит к его асимметрии, что может негативно сказаться на точности измерений. Асимметрия появляется даже при $\Delta W_s = 0,18\lambda$, тогда как уровень компенсации $\Delta W_s \leq \lambda/4$ считается достаточным для большинства оптических систем. Столь значительное влияние aberrаций объясняется двойным прохождением света через ГХО. При этом происходит мультиплицирование даже незначительных aberrационных искажений. Таким образом, в результате моделирования установлено, что при проектировании ВКИС следует устанавливать жесткие требования к качеству оптических элементов: ошибка волнового фронта должна быть не более $\Delta W \leq \lambda/10$.

Для достижения оптимальных характеристик ВКИС необходимо точное согласование волновых фронтов линзы и ДОЭ с целью сведения сферической aberrации к нулю. Это обстоятельство ограничивает применение различных линз с одним и тем же ДОЭ (лучше использовать линзу с параметрами, которые использовались при расчете ДОЭ).

Однако в процессе моделирования было установлено, что имеется возможность варьировать параметры используемых линз в некоторых пределах. Например, при использовании также плоско-выпуклой линзы, но с большим фокусным расстоянием, чем использовалось при расчете, можно достичь компенсации сферической aberrации путём изменения расстояния между линзой и ДОЭ. На рисунке 2 показано как при этом меняется спектральный сигнал с ВКИС. Видно, что в некоторой оптимальной точке сигнал становится симметричным и узким, т.е. здесь достигается компенсация сферической aberrации.

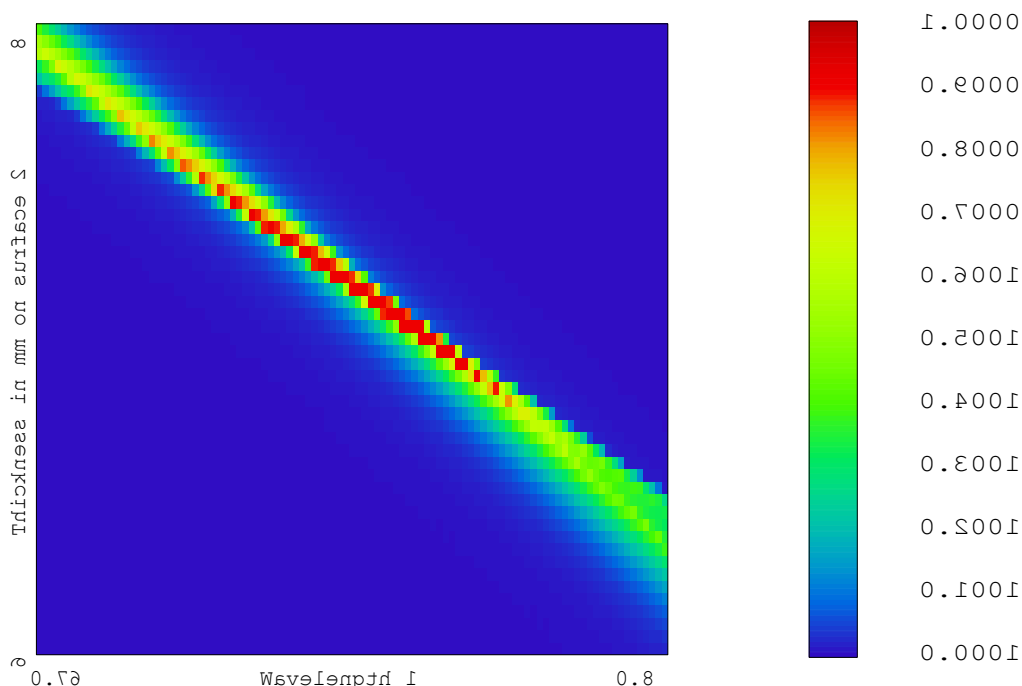


Рис. 2. Результаты моделирования спектрального сигнала волоконной конфокальной измерительной системы при изменении расстояния между линзой и ДОЭ

Таким образом показано, что путём замены линз имеется возможность изменения диапазона измерения Δz ВКИС даже при использовании одного ДОЭ.

2. Результаты экспериментальных исследований

Для проведения исследований ВКИС был спроектирован и настроен экспериментальный стенд, схема которого приведена на рисунке 3.

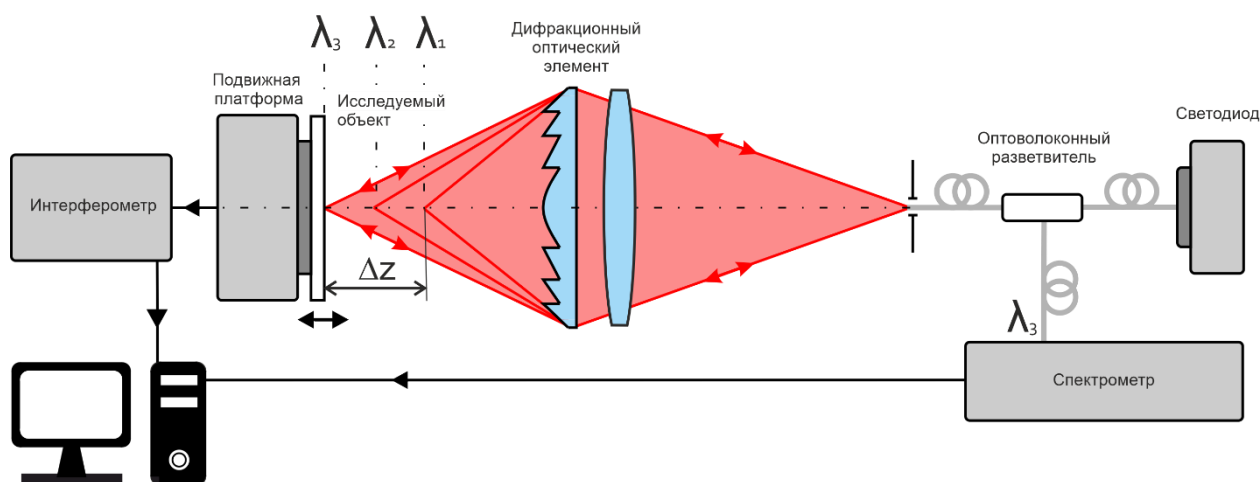


Рис. 3. Оптическая схема волоконной конфокальной измерительной системы на основе метода хроматического кодирования

В качестве осветителя используется суперлюминесцентный диод SLD-790-14BF (Nolatech, Россия). ГХО состоит из ДОЭ, изготовленного на круговой лазерной записывающей системе [6] (АО «Новосибирский приборостроительный завод), и одиночной линзы с фокусным расстоянием 36 мм. Исследуемый объект смещается с помощью подвижной платформы, в состав которой входит трехкоординатный столик ZSS 33.200.1.2 (Phytron, Германия). Спектр отраженного излучения вводится через волоконный ответвитель в спектрометр QwaveVIS (RGB Lasersystems, Germany) и далее анализируется в специальном программном обеспечении.

В ходе эксперимента было определено оптимальное расстояние между ДОЭ и одиночной линзой, при котором сферическая aberrация сводилась к нулю, а ширина спектра отраженного от объекта света уменьшалась до своего оптимального значения таким образом, как показано на рисунке 4. При такой настройке чувствительность схемы ВКИС к смещениям образца составляет 0,1 мкм и менее.

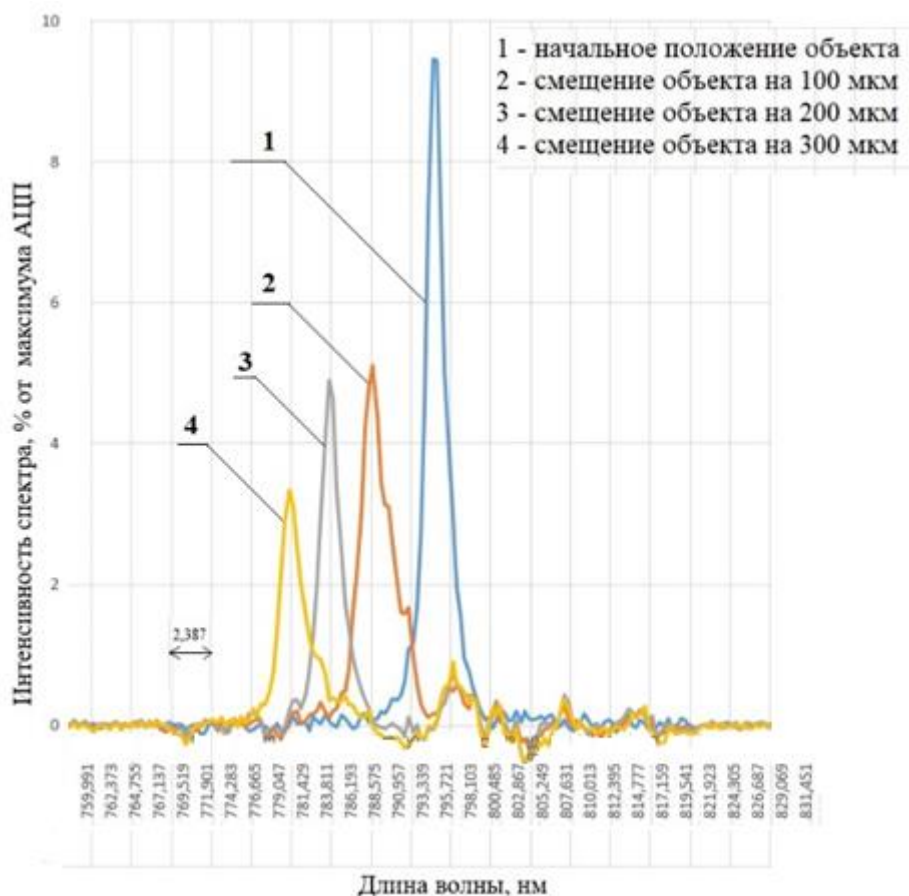


Рис. 4. Графики распределения спектра отраженного от объекта света при его разных смещениях вдоль хроматического отрезка

Заключение

В результате программного моделирования показано, что в волоконной конфокальной измерительной системе на основе хроматического кодирования при использовании источника света с шириной спектра менее 40 нм ошибка волнового фронта, формируемого ГХО, не должна превышать $\Delta W \leq \lambda/10$;

Теоретически и экспериментально показано, что в гиперхроматическом объективе при использовании линз с различным фокусным расстоянием возможна компенсация сферической аберрации путем изменения расстояния между ДОЭ и одиночной линзой.

Таким образом, для измерения смещений и микропрофиля поверхности оптических прозрачных сред проведено исследование волоконной конфокальной измерительной системы на основе суперлюминесцентного диода и гибридного гиперхроматического объектива. Смещение и перепад высот объекта определяется измерением спектра отраженного от поверхности излучения с выделением доминирующей длины волны с помощью специальных программных алгоритмов и реализации принципа конфокальности оптической схемы волоконной конфокальной измерительной системы. Фокусное расстояние гибридного гиперхроматического объектива составляет 15 мм, длина хроматического отрезка – 300 мкм, а разрешение смещения по поперечному сечению – менее 0,1 мкм.

Результаты экспериментальных исследований являются основой для интеграции волоконной конфокальной измерительной системы в оптические системы и комплексы для микропрофилирования поверхностей. Благодаря своим преимуществам (бесконтактный режим измерения, малое фокальное пятно, высокая точность) он позволит осуществлять прецизионное позиционирование и высокоточную оцифровку трехмерных поверхностей.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки России в части проекта АААА-А21-121011490030-4.

Список источников

- [1] **Bai, J.** et al. Chromatic confocal displacement sensor with optimized dispersion probe and modified centroid peak extraction algorithm / J. Bai, X. Li, X. Wang, Q. Zhou, K Ni //Sensors. – 2019. – Т. 19. – №. 16. – С. 3592. – DOI: 10.3390/s19163592.
- [2] **Wertjanz, D.** et al. Compact scanning confocal chromatic sensor enabling precision 3-D measurements / D. Wertjanz, T. Kern, E. Csencsics, G. Stadler, G. Schitter // Applied Optics. – 2021. – Т. 60. – №. 25. – С. 7511-7517. – DOI: 10.1364/AO.428374.
- [3] **Завьялова, М. А.** Моделирование и расчет гиперхроматических объективов для волоконных конфокальных датчиков поверхности на основе метода хроматического кодирования / М. А. Завьялова, П. С. Завьялов // Фотоника. – 2017. – №. 5. – С. 80-90. – DOI: 10.22184/1993-7296.2017.65.5.80.90.
- [4] **Завьялова, М. А.** Экспериментальные исследования волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования / М. А. Завьялова, П. С. Завьялов, М. В. Савченко // Фотоника. – 2021. – Т. 15. – № 7. – С. 598-609. – DOI 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.7.598.609.
- [5] Акционерное общество НОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА / URL: <http://nolatech.ru/files/datasheet/SLD-790-14BF.pdf>.
- [6] **Верхогляд, А. Г.** Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, А. Е. Качкин, С. А. Кокарев, В. П. Корольков // Датчики и системы. – 2015. – №. 9-10. – С. 45-52.

Hyperchromatic elements for fiber confocal measuring systems

M. A. Zavyalova¹, P. S. Zavyalov^{1,2}, D. A. Koverznev^{1,2}, D. R. Khakimov¹

¹ Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The concept of a fiber confocal system based on a superluminescent diode (spectrum width 40 nm) and a hybrid hyperchromatic objective (HCL) is proposed for measuring displacements and a microprofile of a surface with a low reflection coefficient. The displacement and height difference of an object in such a system is determined by measuring the spectrum of radiation reflected from the surface with the selection of the dominant wavelength. As a result of software simulation, it has been shown that the error of the wavefront formed by the GCR should not exceed $\Delta W \leq \lambda/10$. It has been shown theoretically and experimentally that, when using lenses with different focal lengths, it is possible to compensate for spherical aberration by changing the distance between the diffractive

optical element and a single lens. The developed system has a sensitivity to displacements of a transparent glass sample of 0.1 μm or less.

Keywords: Optics, Diffractive optical elements, Hyperchromatic lenses, Confocal method, Chromatic coding method.

Цифровая голографическая интерферометрия для оценки параметров импульсной плазмы при атмосферных условиях

А. М. Кожевникова, И. В. Алексеенко, Д. В. Шитц

Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Калининград, Россия

В работе представлен метод наблюдения импульсной плазмы искрового разряда при атмосферных условиях с использованием метода цифровой голографической интерферометрии. Искровой разряд генерировался при атмосферных условиях между двумя электродами с частотой 5 кГц, время подачи напряжения на электроды составляло 1250 нс. Для оценки динамически изменяющихся процессов в плазме, была разработана система сканирования разряда во времени. Показано, что изменение контраста на распределении разности фаз соответствует времени генерации искрового разряда, что также свидетельствует об изменении концентрации электронов в плазме. Проведена оценка концентрации электронов в различные моменты генерации плазмы. Рассмотрены ограничения предложенного метода и обсуждается его применимость для исследования низкотемпературной импульсной плазмы.

Ключевые слова: Цифровая голографическая интерферометрия, Холодная плазма, Диагностика плазмы, Концентрация электронов.

Цитирование: Кожевникова, А. М. Цифровая голографическая интерферометрия для оценки параметров импульсной плазмы при атмосферных условиях / А. М. Кожевникова, И. В. Алексеенко, Д. В. Шитц // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 281–284.

Введение

Нетепловая плазма при атмосферном давлении в настоящее время используется в технике или медицине [1-4]. Обычно для воздействия на объект требуются низкие температуры газов, особенно при обработке биологических тканей. Для обеспечения таких условий используются методы импульсного излучения плазмы с частотами 5-15 кГц и длительностью от 10 до 5000 нс. При таких применениях плазмы необходима оценка ее экспозиционной дозы, и ее можно было бы определить по концентрации ее электронов.

Для получения полной информации о характере развития плазменного разряда представляет интерес обеспечение визуализации в области пробоя. Сканирование по времени плазменного разряда может быть осуществлено методами лазерной визуализации прозрачных сред, к которым можно отнести Шлирен-метод и голографические методы. Метод Шлирен-фотографии позволяет детализировать структуру разряда в том числе и в начальные моменты его развития [5]. Визуализация микроканальной структуры разряда позволяет более точно судить о энергетических параметрах плазмы, так как при математических расчетах концентрации электронов в плазме большое значение имеет объем, занимаемый плазмой в пространстве, соответственно в микроканале концентрация электронов может быть значительно выше, чем в интегральном объеме занимаемой плазмой.

Используемые методы и подходы

Предлагается в качестве основного параметра плазмы рассматривать концентрацию электронов. Известно, что изменение концентрации электронов в плазме меняет ее показатель преломления, а использование методов цифровой голографической интерферометрии позволяет проводить оценку концентрации электронов в плазме через соотношение показателя преломления среды с разностью фаз зарегистрированных электромагнитных волн:

$$\Delta\phi(x,y)=\frac{2\pi}{\lambda}\int_{l_2}^{l_1}[n(x,y,z)-n_0]dz,$$

где λ – длина волны излучения лазера; n_0 – показатель преломления наблюдаемой среды в ее начальном состоянии; $n(x, y, z)$ – конечное распределение показателя преломления.

Связь же разности фаз с концентрацией электронов в плазме, как показано в [7], будет иметь вид:

$$N_e=2,2\times 10^{13}\frac{\Delta\phi}{2\pi l\lambda}, \quad (1)$$

где l – длина пути света в исследуемой среде.

Плазма искрового разряда была выбрана для отработки методики эксперимента, поскольку ее легко можно получить в нормальных условиях с ожидаемо большей электронной концентрацией, чем в плазменной струе.

Методы голографической интерферометрии хорошо известны и применяются для исследования прозрачных (фазовых) объектов, в том числе плазмы [6-8]. Однако, большинство результатов по исследованию плазмы продемонстрированы методом сравнения полос, который сопоставим с использованием методов аналоговой голографии, в то время как цифровые методы регистрации изображений и современные возможности синхронизации быстропротекающих импульсных процессов могут позволить получить больше информации о такого рода объектах. Основной целью исследования было определение концентрации электронов в плазменном канале в различные моменты времени от начала искрового пробоя до его завершения. Во многом, результативность работы зависит от точности синхронизации процессов, поэтому для этих целей была разработана программно-аппаратная схема автоматизации эксперимента, которая позволила провести сканирование всего разряда по мере его развития.

Результаты

На рисунке 1 продемонстрированы результаты регистрации искрового разряда методами цифровой голографической интерферометрии, а также представлены значения разности фаз вдоль выделенных на рисунке 1а координат. На графиках видно, что фазовый контраст увеличивается при приближении к электроду, что соответствует увеличению электронной концентрации вблизи электродов [9-10].

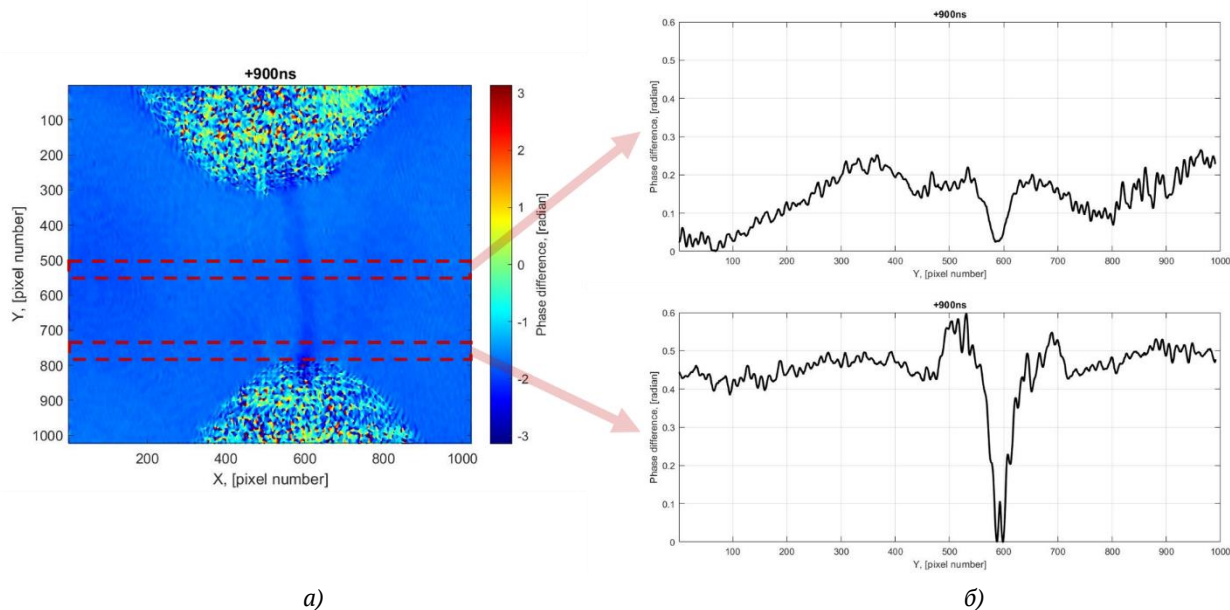


Рис. 1. Результаты эксперимента по регистрации искрового разряда; (а) интерференционная картина разности фаз со скомпенсированными тепловыми эффектами в поле наблюдения; (б) графическое представление разности фаз в вдоль оси X в значениях $(x, y) = (0:1020, 500:550)$ и $(x, y) = (0:1020, 730:780)$.

В соответствии с графиками на рисунке 1(б) видно, что распределение разности фаз вдоль плазменного канала изменяется и увеличивается вблизи электродов. Используя формулу 1, можно получить значение концентрации электронов N_e . Таким образом для представленного момента времени развития искрового разряда, концентрация электронов в центральной области будет минимальна и составляет $n_{e\ min} = 4,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а в приэлектродной области максимальна и составляет $n_{e\ max} = 8,2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Заключение

В данной работе представлены метод и голографическая установка для исследования высокочастотного плазменного искрового разряда, генерируемого в импульсном режиме. На основе взаимной синхронизации также можно получать голограммы в разные моменты существования плазмы как процесс сканирования при ее развитии во времени. Этот подход позволяет наблюдать фазовые изменения, связанные с изменением показателя преломления плазмы, а также оценивать концентрацию электронов в плазменном канале. В соответствии с различными моментами времени были оценены численные значения концентрации электронов для различных областей в плазменном канале.

Благодарность

Доклад подготовлен в рамках гранта РФФ 23-79-00023 «Оптический неразрушающий контроль и диагностика первой стенки ТОКАМАК-реакторов с использованием метода двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии и системы лазерного сканирования».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Laroussi, M.** Low-temperature plasmas for medicine? // IEEE transactions on plasma science. – 2009. – Т. 37. – №. 6. – С. 714-725.
- [2] **Stepanova, O.** Bactericidal effect of a dielectric barrier discharge plasma jet generated in laminar and preturbulent helium flows / O. Stepanova, O. Rybalchenko, M. Pinchuk, A. Astafiev, O. Orlova, V. A. Spodobin, A. A. Kudryavtsev // Plasma Medicine. – 2017. – Т. 7. – №. 3.
- [3] **Mohamed, H.** Non-thermal plasma as a novel strategy for treating or preventing viral infection and associated disease / H. Mohamed, G. Nayak, N. Rendine, B. Wigdahl, F. C. Krebs, P. J. Bruggeman, V. Miller // Frontiers in Physics. – 2021. – Т. 9. – С. 683118.
- [4] **Roth, J. R.** Industrial plasma engineering: Volume 2: Applications to nonthermal plasma processing. / J. Roth // Reece. – CRC press, 2001. – Т. 2.
- [5] **Almazova, K. I.** Microstructure of a spark discharge in air in a point–plane gap / K. I. Almazova, A. N Belonogov, V. V. Borovkov, E. V. Gorelov, I. V. Morozov, A. A. Tren'kin, S. Y. Kharitonov // Technical Physics. – 2018. – Т. 63. – С. 801-805.
- [6] **Ostrovskaya, G. V.** IV Holographic Methods of Plasma Diagnostics / G. V. Ostrovskaya, Y. I. Ostrovsky // Progress in optics. – Elsevier, 1985. – Т. 22. – С. 197-270.
- [7] **Вовченко, Е. Д.** Лазерные методы диагностики плазмы / Е. Д. Вовченко, А. П. Кузнецов, А. С. Савелов // М.: МИФИ. – 2008. – Т. 1. – С. 3.
- [8] **Зайдель, А. Н.** Применение голографической интерферометрии для диагностики плазмы // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 149. – №. 5. – С. 105-138.
- [9] **Жданов, С. К.** Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / С. К. Жданов, В. А. Курнаев, М. К. Романовский, И. В. Цветков // М.: МИФИ. – 2000. – Т. 184.
- [10] **Самусенко, А. В.** Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей. / А. В. Самусенко, Ю. К. Стишков / Уч.-метод. Пособие. – СПб. : BVM, 2012. – 649 с.

Digital holographic interferometry for the assessment of pulsed plasma parameters under atmospheric conditions

A. M. Kozhevnikova, I. V. Alekseenko, D. V. Schitz

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, Moscow, Russia

The paper presents a method for observing pulsed spark discharge plasma under atmospheric conditions using digital holographic interferometry, which also allows us to demonstrate the possibility of estimating the electron concentration in cold plasma. The spark discharge was generated under atmospheric conditions between two electrodes at a frequency of 5 kHz, the time of voltage application to the electrodes was 1250 ns. In order to evaluate dynamically changing processes in plasma, a time-scanning system of the discharge was developed, which consists of a hardware-software complex of device synchronization and makes it possible to record a series of holograms with different preset time conditions. It is shown that the contrast change on the phase difference distribution corresponds to the time of spark discharge generation, which also indicates the change in the electron concentration in the plasma. The concentration of electrons at different moments of plasma existence was estimated. The limitations of the proposed method are considered and its applicability to the study of low-temperature pulsed plasma is discussed.

Keywords: Digital holographic interferometry, Cold plasma, Plasma diagnostics, Electron density.

Моделирование процесса дифракции лазерного излучения и исследование погрешностей метода контроля высот шероховатостей субнанометрового уровня оптических поверхностей

Д. Г. Денисов, В. Е. Карасик

МГТУ им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005

На сегодняшний день для диагностики высотных статистических параметров субнанометрического уровня используются различные классы оптико-электронных устройств и систем. Наибольший интерес в задачах высокоточного сертификационного контроля представляют такие перспективные приборы и системы, как динамические интерферометры, а также устройства, позволяющие оценивать среднеквадратичное значение поверхностных неоднородностей субнанометрового уровня по анализу индикатрисы рассеянного лазерного излучения.

Ключевые слова: Оптический контроль, метод дифференциального рассеяния, индикатриса рассеяния, коэффициент отражения по двум угловым координатам, поверхностные неоднородности.

Цитирование: Денисов, Д. Г. Моделирование процесса дифракции лазерного излучения и исследование погрешностей метода контроля высот шероховатостей субнанометрового уровня оптических поверхностей / Д. Г. Денисов, В. Е. Карасик // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 285–286.

Для достижение высоких технологические показатели качества различных оптических деталей нового поколения, необходим не только современный подход к методам и средствам обработки деталей, но и реализация перспективных высокоточных бесконтактных методов диагностики. Особое внимание в единой технологической цепочке занимают стадии глубокой полировки, когда высотные статистические параметры профилей достигают нано – и субнанометровых уровней. Для диагностики высотных статистических параметров субнанометрового уровня на сегодняшний день применяются различные классы оптико – электронных приборов и систем. В мировой практике методы, основанные на анализе индикатрис рассеянного лазерного излучения классифицируются на [1,2]: методы полного интегрального рассеяния (TIS - Total Integrated Scattering), методы определения функции распределения коэффициента отражения по двум угловым координатам (метод определения характеристики BRDF - Bidirectional Reflectance Distribution Function), методы дифференциального рассеяния (ARS – Angle-Resolved Scattering). Анализ влияния ограничительных факторов в методе дифференциального рассеяния позволяет определить его систематическую погрешность повысив точность измерения. Для полученного выражения индикатрисы было проведено математическое моделирование процесса

рассеяния лазерного излучения с учётом аппаратных ограничений по углам подсвета и рассеяния, шумов электронного тракта и рассеяния Рэлея.

Для апробации предложенного алгоритма анализа ограничительных факторов были проанализированы численные значения параметров, приведенные в [1,2]. В качестве источника излучения использовался He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм. Рассеяние измерялось в плоскости падения ($\varphi = 0$) в диапазоне углов рассеяния $5^\circ - 85^\circ$ при угле падения 10° (в работе также приведено моделирование для угла падения 50°). Заданные характеристики образцов приведены в [1,2]. Было проанализировано восстановление эффективной величины СКО ($\sigma_{эфф}$) и высотных параметров исследуемых профилей полированных кварцевых подложек ($\varepsilon = 2,12$) при экспоненциальной статистике распределения. Исходя из проведенных исследований, было выявлено, что аппаратные ограничения оказывают наибольшее влияние на восстановление $\sigma_{эфф}$ и являются неотъемлемой частью систематической погрешности при измерении.

Список источников

- [1] Денисов Д. Г. Анализ влияния ограничительных факторов в методе дифференциального рассеяния при контроле поверхностных неоднородностей субнанометрового уровня профилей оптических деталей //Прикладная физика. – 2022. – №. 1. – С. 89.
- [2] Азарова В. В. и др. Теория дифференциального и интегрального рассеяния лазерного излучения на поверхности диэлектрика с учетом наличия дефектного слоя //Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – №. 8. – С. 740-744.

Modeling of the laser radiation diffraction process and investigation of errors in the method of controlling the heights of roughness of the subnanometer level of optical surfaces

D. G. Denisov, V. E. Karassik

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

To date, various classes of optoelectronic devices and systems are used to diagnose the height statistical parameters of the subnanometer level. The greatest interest in the tasks of high-precision certification control is represented by such promising devices and systems as dynamic interferometers, as well as devices that allow estimating the RMS value of surface inhomogeneities of the subnanometer level according to the analysis of the scattered laser radiation indicatrix.

Keywords: Optical control, Differential scattering method, Scattering indicatrix, Reflection coefficient along two angular coordinates, Surface inhomogeneities.

Исследование и анализ процесса дифракции лазерного излучения на мелкомасштабных поверхностных неоднородностях субнанометрового уровня профилей оптических поверхностей

Д. Г. Денисов, В. Е. Карасик

МГТУ им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005

Проанализированы результаты теоретических исследований, посвящённых изучению когерентных свойств источников оптического излучения. Рассмотрены понятия временное и пространственной когерентности квазимонохроматического источника излучения, а также понятие площади и объёма квантово-механической ячейки в определённой области пространства для конкретного типа источника оптического излучения. Для анализируемого объёма когерентности учитывается среднее число фотонов в определённом спиновом состоянии, которое определяет параметр вырождения лазерного излучения (электромагнитного поля) в квантовой статистике.

Ключевые слова: Временная когерентность, Пространственная когерентность, Параметр вырождения лазерного излучения, Поляризация лазерного излучения.

Цитирование: Денисов, Д. Г. Исследование и анализ процесса дифракции лазерного излучения на мелкомасштабных поверхностных неоднородностях субнанометрового уровня профилей оптических поверхностей / Д. Г. Денисов, В. Е. Карасик // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 287–288.

Как известно все источники оптического излучения характеризуются не только определёнными пространственно-угловыми характеристиками, но спектральными и когерентными свойствами [1,2]. Так, например, при рассмотрении физических процессов интерференции важными являются проявления временной когерентности между двумя пучками, поскольку формируемый контраст интерферограмм зависит от времени задержки между этими пучками. В свою очередь произведение времени задержки на ширину полосы спектральной линии источника излучения должно быть менее единицы, что в свою очередь определяет время и длину когерентности источника излучения. При суперпозиции как минимум двух пучков оптического излучения с учётом фазовых соотношений, между ними определяющим образом влияет пространственная когерентность, характеризующая расстояние между двумя осциллирующими источниками (вторичными). Результат суперпозиции наблюдается в некоторой плоскости локализации интерференционных полос, удалённой от вторичных источников на определённом расстоянии. Площадь анализируемой плоскости локализации называют площадью когерентности оптического излучения, а квадратный корень из данной величины определяет поперечную длину когерентности. Допуская, что электромагнитное поле представляет собой плоскую квазимонохроматическую, линейно поляризованную волну, можно показать, что прямой

цилиндр, основанием которого является площадь когерентности, высотой равной продольной когерентности определяет объём когерентности некоторой квантово-механической ячейки в пространстве. В данном объёме может содержаться определённое количество фотонов.

В объёме представленной квантово-механической ячейки содержание среднего числа фотонов в определённом спиновом состоянии определяет параметр вырождения. На языке квантовой статистики параметр вырождения представляет собой среднее число фотонов, находящихся в одинаковом квантовом состоянии [2]. Дальнейшие теоретические исследования дают основания предполагать о том, что именно параметр вырождения является первичным в определении когерентных свойств оптического и в частности лазерного излучения с точки зрения количества содержания фотонов в анализируемой квантово-механической ячейке. Важно отметить, что параметр вырождения определяющим образом будет влиять на пространственную когерентность лазерного излучения при его взаимодействии с объектом (предметом), имеющим неоднородный профиль поверхности, а значит определять условия формирования пространственной спекл-структуры. Последняя, в свою очередь в значительной степени влияет как на распределение интенсивности среднего значения, так и на контраст регистрируемого видеоизображения в оптико-электронных приборах контроля параметров качества оптических изделий.

Список источников

- [1] Ларкин, А. И. Когерентная фотоника / А.И.Ларкин, Ф.Т.С. Юу – М.: БИНОМ. Лабратория знаний, 2006. – 317 с.: ил.
- [2] Вольф Э., Мандель Л. Когерентные свойства оптических полей. I //Успехи физических наук. – 1965. – Т. 87. – №. 11. – С. 491-520.

Investigation and analysis of the process of diffraction of laser radiation on small-scale surface inhomogeneities of the subnanometer level of optical surface profiles

D. G. Denisov, V. E. Karassik

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The results of theoretical studies devoted to the study of coherent properties of optical radiation sources are analyzed. The concepts of temporal and spatial coherence of a quasi-monochromatic radiation source are considered, as well as the concept of the area and volume of a quantum-mechanical cell in a certain area of space for a specific type of optical radiation source. For the analyzed coherence volume, the average number of photons in a certain spin state is taken into account, which determines the degeneracy parameter of laser radiation (electromagnetic field) in quantum statistics.

Keywords: Temporal coherence, Spatial coherence, Laser radiation degeneracy parameter, Laser radiation polarization.

Квантовая память в резонаторных схемах: новые подходы и эксперименты

С. А. Моисеев

Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

Изучаются возможности реализации квантовой памяти в резонаторных схемах, позволяющие с высокой эффективностью сохранять широкополосные световые и микроволновые импульсы. Рассматриваются способы увеличения эффективности и спектрального диапазона квантовой памяти, времени хранения сигнального излучения, способы достижения высокой эффективности и интеграции атомов в резонаторы. Обсуждаются последние эксперименты в реализации многорезонаторных схем квантовой памяти и возможности улучшения ее базовых параметров до практически значимых значений.

Ключевые слова: Оптическая и микроволновая квантовая память, Резонатор.

Цитирование: Моисеев, С. А. Квантовая память в резонаторных схемах: новые подходы и эксперименты / С. А. Моисеев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 289–292.

Среди разрабатываемых подходов к реализации оптической и микроволновой квантовой памяти, отметим протоколы, использующие варианты обратимого фотонного эха [1,2,3], которые дают возможность запоминать большое число световых импульсов произвольной временной формы. Данные возможности сохраняются и при реализации *квантовой памяти на фотонном эхе в резонаторе* (ФЭКПР). Базовая схема ФЭКПР включает неоднородно уширенный ансамбль резонансных атомов, который помещается в одномодовый резонатор. При этом высокая эффективность памяти обеспечивается внутри спектральной ширины $\delta\omega_{qm} < \kappa/3$ [4] при согласовании импедансов $\kappa = \kappa$, где $\kappa = \omega_0/(2Q)$ - постоянная взаимодействия моды резонаторы с модами внешнего волновода, ω_0 и Q - частота и добротность нагруженного резонатора, κ - коэффициент резонансного поглощения атомов на частоте резонатора, пропорциональный числу атомов. Подобные свойства ФЭКПР имеют место и для Λ -схемы нерезонансного рамановского взаимодействия с атомами в присутствии дополнительного контролирующего лазерного поля на смежном квантовом переходе [5,6], что представляется перспективным для реализации такой памяти на ансамбле редкоземельных ионов, обладающих достаточно узким неоднородным уширением оптического перехода. Использование резонаторов, обладающих большой добротностью, позволяет уменьшить пространственные размеры ячейки памяти и максимально облегчить удовлетворение условия согласования импедансов для Λ -схемы ФЭКПР, но уменьшает рабочий спектральный диапазон квантовой памяти. Ниже мы обсуждаем новые возможные схемы реализации широкополосной ФЭКПР.

Уменьшение спектральной ширины ФЭКПР обусловлено влиянием спектральной дисперсии атомного отклика в одномодовом резонаторе. Для подавления спектральной дисперсии в работе [7] предлагается дополнительно включить дисперсионное взаимодействие атомов с сигнальным излучением, вовлекая еще одну Λ -схему атомных переходов вместе с контролирующим лазерным полем. Дисперсионное взаимодействие, обеспечиваемое достаточно большим отклонением частоты контролирующего поля от частоты атомного перехода, не вызывает дополнительного нежелательного усиления или поглощения сигнального излучения, что обеспечивает уширение спектрального диапазона при выборе оптимальных параметров добавляемого взаимодействия. Ниже мы обращаем внимание на возможность использования альтернативных схем, в которых вместо двух Λ -схем атомных переходов используются: а) двухуровневая схема на основном переходе, где сохраняется сигнальное излучение и Λ -схема для дисперсионного контроля взаимодействия; б) используются две двухуровневые схемы для реализации обоих взаимодействий. Использование Λ -схемы удобно для дисперсионного взаимодействия наличием большого времени жизни низколежащих атомных уровней, хотя требует дополнительного контролирующего лазерного излучения заданной частоты. Использование двухуровневой схемы для дисперсионного взаимодействия требует согласования частот резонансных переходов и задания подходящей оптической плотности. Теоретический анализ рассматриваемых схем, содержащих контролируемые параметры дисперсионного взаимодействия, позволяет на порядок увеличить спектральную ширину ФЭКПР. Дальнейшее увеличение спектральной ширины также возможно, но за счет увеличения спектрального диапазона для вводимого дисперсионного взаимодействия атомов в резонаторе, например, за счет добавления новых лазерных полей.

Другой способ подавления спектральной дисперсии за пределами спектральной ширины отдельного резонатора состоит в использовании серии резонаторов, частоты которых покрывают спектральный диапазон, значительно превосходящий ширину линии отдельного резонатора. Частоты резонаторов образуют периодическую гребенку, и связаны с внешним волноводом заданной постоянной взаимодействия [8,9]. Работоспособность этих схем квантовой памяти была затем подтверждена в последующих экспериментах [10,11]. Было показано, что возможны различные способы объединения резонаторов в общую схему квантовой памяти. Многообещающие свойства обнаружены для схем, где несколько резонаторов связаны с волноводом через общий резонатор [12], и было продемонстрировано, что в такой системе резонаторов можно без труда обеспечивать согласование импедансов, поскольку постоянная их взаимодействия с волноводом и с другими резонаторами может без ограничений варьироваться в широком пределе. На такой схеме квантовой памяти недавно была продемонстрирована экспериментально рекордная эффективность в сохранении микроволновых фотонов на системе сверхпроводящих резонаторов [13] и было показано, что она может сохранять сигнальные импульсы на произвольно долгое время при использовании переключателя, соединяющего общий резонатор с внешним волноводом [14].

Было показано, что многорезонаторная схема памяти позволяет сохранять сигнальные импульсы с произвольной формой спектра и может достигать предельной высокой эффективности [15], необходимой для использования в квантовом компьютере, когда эффективность ограничивается лишь добротностью отдельного резонатора. Вместе с тем, сохранение широкополосных входных сигнальных полей на большие времена требует использования долгоживущих носителей квантовой информации в системе резонаторов и разработки эффективных способов управления квантовой когерентности этих носителей. Такой контроль может быть реализован при соединении рассматриваемой системы резонаторов с дополнительными волноводами и/или резонаторами, используемыми для распространения управляющих интенсивных классических световых (электромагнитных) импульсов. В частности, представляет интерес двухслойная планарная волноводно-резонаторная схема. Один слой волноводов и резонаторов используется для транспорта сигнальных квантовых состояний света, а второй слой – для контролируемых классических лазерных импульсов. Волноводы слоев должны быть расположены далеко друг от друга, а частоты резонаторов в соседних слоях не быть резонансными друг другу. Между близко расположенными слоями резонаторов помещаются резонансные атомы, которые находятся в эванесцентной области сигнальных и контролируемых полей, совместное действие которых позволит обеспечить резонансное возбуждение атомов на долгоживущие состояния в Λ -схеме квантовых переходов. Разработка и создание подобных и более сложных волноводно-резонаторных систем возможно существующими технологиями интегральной оптики и микроволновой сверхпроводящей техники.

Благодарность

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России Рег. номер НИОКТР 121020400113-1.

Список источников

- [1] **Moiseev, S.** Complete reconstruction of the quantum state of a single-photon wave packet absorbed by a doppler-broadened transition / S. Moiseev and S. Kröll // *Phys. Rev. Let.* — 2001. — Vol 87. — № 17. — P. 137601.
- [2] **Tittel, W.** Photon-echo quantum memory in solid state systems / W. Tittel, M. Afzelius, T. Chanelière, R. Cone, S. Kröll, S. Moiseev, and M. Sellars // *Laser & Photonics Reviews.* — 2009. — Vol 4. — № 2. — P. 244–267.
- [3] **Chanelière, T.** Quantum optical memory protocols in atomic ensembles / T. Chanelière, G. Hétet, and N. Sangouard // *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics.* — 2018. — Vol 67. — P. 77–150.
- [4] **Moiseev, S. A.** Efficient multi-mode quantum memory based on photon echo in optimal QED cavity / S. A. Moiseev, S. N. Andrianov, F. F. Gubaidullin // *Phys. Rev. A* – 2010. – Vol 82. – P. 022311.
- [5] **Moiseev, S. A.** Off-resonant Raman-echo quantum memory for inhomogeneously broadened atoms in a cavity / Moiseev S. A. // *Phys. Rev. A* – 2013. – Vol. 88. – P. 012304.
- [6] **Kalachev, A.** Raman quantum memory based on an ensemble of silicon- vacancy centers in diamond / A. Kalachev, A. Berezhnoi, P. Hemmer and O. Kocharovskaya // *Laser Physics.* – 2019. – Vol 29. - № 10. – P. 104001.

- [7] **Moiseev, E. S.** Broadband quantum memory in a cavity via zero spectral dispersion / E. S. Moiseev, A. Tashchilina, S. A. Moiseev, B. C. Sanders // *New Journal of Physics*. – 2021. - Vol 23. – P. 063071.
- [8] **Moiseev, E. S.** All-optical photon echo on a chip / E. S. Moiseev and S. A. Moiseev // *Laser Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 14. – P. 015202.
- [9] **Moiseev, S. A.** Multiresonator Quantum Memory / S. A. Moiseev, F. F. Gubaidullin, R. S. Kirillov, R. R. Latypov, N. S. Perminov, K. V. Petrovnin, O. N. Sherstyukov // *Phys.Rev.A*. – 2017. – Vol. 95. – P. 012338
- [10] **Petrovnin, K. V.** Quantum memory in the scheme of revival of silenced echo in an optical resonator / K. V. Petrovnin, N. S. Perminov, O. N. Sherstyukov, S. A. Moiseev // *Quantum Electronics* – 2018. – Vol. 48 - № 10. – P. 894 –897.
- [11] **Bao, Z.** On-Demand Storage and Retrieval of Microwave Photons Using a Superconducting Multiresonator Quantum Memory / Z. Bao, Z. Wang, Y. Wu, Y. Li, C. Ma, Y. Song, H. Zhang, L. Duan // *Phys. Rev. Lett.* – 2021. - Vol. 127. – P. 010503.
- [12] **Moiseev, S. A.** Broadband multiresonator quantum memory-interface / S. A. Moiseev, K. I. Gerasimov, R. R. Latypov, N. S. Perminov, K. V. Petrovnin, and O. N. Sherstyukov // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. - P 3982.
- [13] **Matanin, A. R.** Towards highly efficient broadband superconducting quantum memory. / A. R. Matanin, K. I. Gerasimov, E. S. Moiseev, N. S. Smirnov, A. I. Ivanov, E. I. Malevannaya, V. I. Polozov, E. V. Zikiy, A. A. Samoilov, I. A. Rodionov, and S. A. Moiseev // *Phys. Rev. Applied* – 2023. Vol. 19. - № 3. – P. 034011.
- [14] **Perminov, N. S.** Integrated multiresonator quantum memory / N. S. Perminov and S. A. Moiseev // *Entropy* – 2023. – Vol. 25. - № 4. – P. 623.
- [15] **Perminov, N. S.** Spectral-Topological Superefficient Quantum Memory // N. S. Perminov and S. A. Moiseev // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1568.

Quantum memory in resonator circuits: new approaches and experiments

S. A. Moiseev

Kazan Quantum Center, Kazan National Research Technical University n.a. A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

The possibilities of implementing quantum memory in resonator circuits are being studied, which make it possible to store broadband light and microwave pulses with high efficiency. The methods of increasing the efficiency and spectral range of quantum memory, the storage time of signal pulses, ways to achieve high efficiency and integration of atoms into resonators are considered. Recent experiments in the implementation of the multi-resonator quantum memory schemes and the possibility of improving its basic parameters to practically significant values are discussed.

Keywords: Optical and microwave quantum memory, Resonator.

Узкополосный источник запутанных фотонных пар телекоммуникационного диапазона длин волн для оптической квантовой памяти и квантового повторителя

К. И. Герасимов, М. М. Миннегалиев, А. Ф. Хайруллин, С. А. Моисеев

Казанский квантовый центр Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева, Казань, Россия

Разработан яркий источник поляризационно-запутанных фотонных пар с длиной волны $\sim 1,5$ мкм и спектральной шириной ~ 5 МГц. Источник работает на основе спонтанного параметрического рассеяния в периодически поляризованном кристалле КТР, помещенного в высокодобротный кольцевой оптический резонатор. Длина волны и ширина спектра запутанных фотонов адаптированы для сохранения в оптической квантовой памяти на основе кристалла $Y_2SiO_5:^{167}Er^{3+}$.

Ключевые слова: Поляризационно-запутанные фотонные пары, Квантовая память, Квантовый репитер, Преобразование света, Оптические резонаторы, Узкополосные одночастотные лазеры.

Цитирование: Герасимов, К. И. Узкополосный источник запутанных фотонных пар телекоммуникационного диапазона длин волн для оптической квантовой памяти и квантового повторителя / К. И. Герасимов, М. М. Миннегалиев, А. Ф. Хайруллин, С. А. Моисеев // NOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 293–298.

Введение

Источники фотонных пар являются фундаментальным компонентом различных приложений квантовой информатики, включая оптические квантовые вычисления, квантовые повторители, квантовую телепортацию и квантовую связь [1]. На сегодняшний день основными методами генерации фотонных пар являются спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) в нелинейных кристаллах [2,3] и четырехволновое смешение (ЧВС) [4] в фотонно-кристаллических волокнах. Оба метода демонстрируют высокую яркость источника двухфотонного излучения с высокой степенью запутанности и неразличимости. Двухфотонные состояния, генерируемые на основе СПР, имеют, как правило, ширину линии от сотен гигагерц до терагерц [5], что на несколько порядков больше, чем ширина линии типичных атомных переходов, используемых в квантовой памяти и составляющих несколько единиц или десятков мегагерц [6]. Однако, было продемонстрировано, что источники СПР в резонаторе могут генерировать яркое узкополосное бифотонное излучение, что позволяет использовать их для сохранения фотонных кубитов в квантовой памяти и квантовых повторителях [7]. В данной работе представлена реализация источника поляризационно-запутанных фотонных пар, используя СПР II типа в узкополосном резонаторе. Генерируемые состояния адаптированы для сохранения в оптической квантовой памяти на основе кристалла $Y_2SiO_5:^{167}Er^{3+}$ с использованием протокола на атомной частотной гребенке.

Экспериментальная реализация

Упрощенная схема источника коррелированных фотонных пар представлена на рис. 1. Лазерное излучение (Л TiS 769,15 нм) с длиной волны 769,15 нм и максимальной мощностью 400 мВт, стабилизируется по частоте при помощи второй гармоники на кристалле ррLN (не отображен на рис. 1.) сечением 1x2 мм и длиной 40 мм, возбуждаемой лазерным излучением на 1538,3 нм (Tortica, не отображен на рис. 1.), которое в свою очередь стабилизируется по частоте при помощи резонатора с высокой резкостью по методу Паунда-Древера-Холла [8, 9]. Далее излучение на 769,15 нм модулируется по амплитуде при помощи акустооптического модулятора (АОМ) и по частоте при помощи электрооптического модулятора (ЭОМ). Последняя модуляция необходима для стабилизации резонатора, в котором осуществляется генерация фотонных пар за счет эффекта СПР II типа. Генерация осуществляется в кристалле ррКТР, второй кристалл КТР используется для усиления кластерного эффекта [10, 11, 12, 13], использование которого позволяет снизить число продольных мод резонатора на которых осуществляется генерация фотонных пар в условиях тройного резонанса. Резонатор автоматически настроен на частоту TiS за счет стабилизации резонатора по излучению TiS. Настройка резонанса для сигнального и холостого фотонов СПР осуществляется выбором температуры кристаллов ррКТР и КТР. Дальнейшая спектральная фильтрация продольных мод осуществлялась внешним эталоном с большим свободным спектральным диапазоном (48,5 ГГц) и спектральной шириной моды эталона ~1 ГГц.

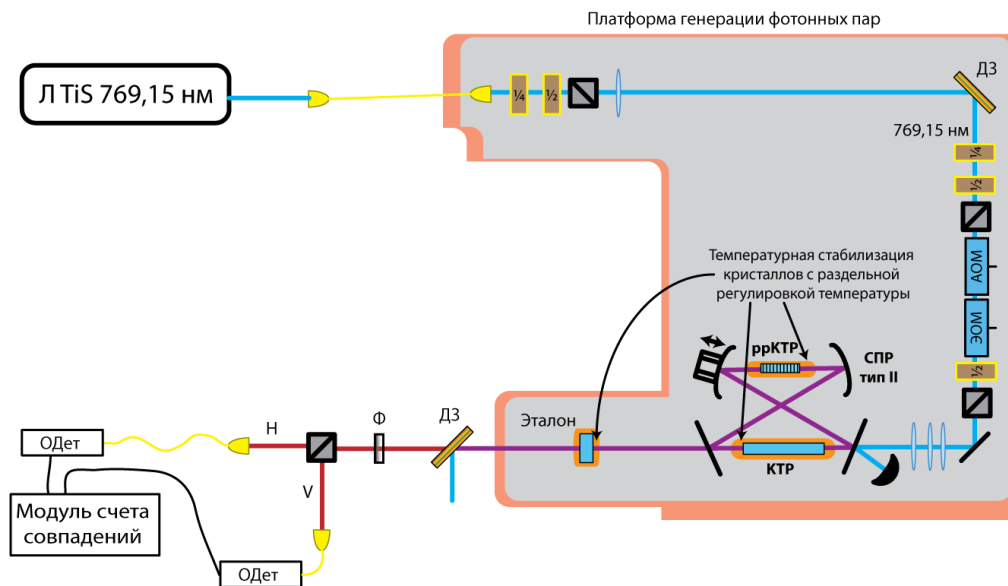


Рис. 1. Схема источника коррелированных фотонных пар

Параметры резонатора представлены на рис. 2.

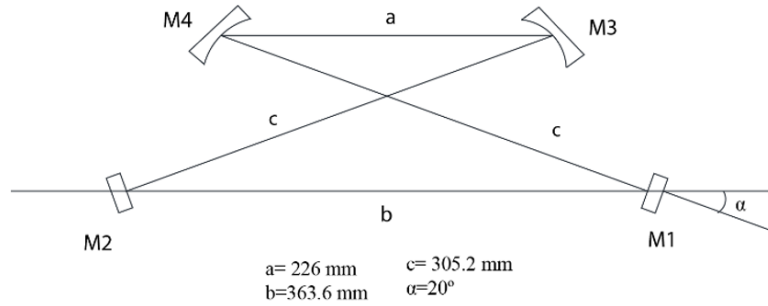


Рис. 2. Схема и параметры кольцевого резонатора для генерации фотонных пар

Далее были проведены эксперименты по измерению кросскорреляционной, автокорреляционной функций и параметра кросскорреляционной функции с оповещением $g^{(2)}(t)$ при $t=0$. Кросскорреляционная функция фотонов в случае использования эталона представлена на рис. 3.

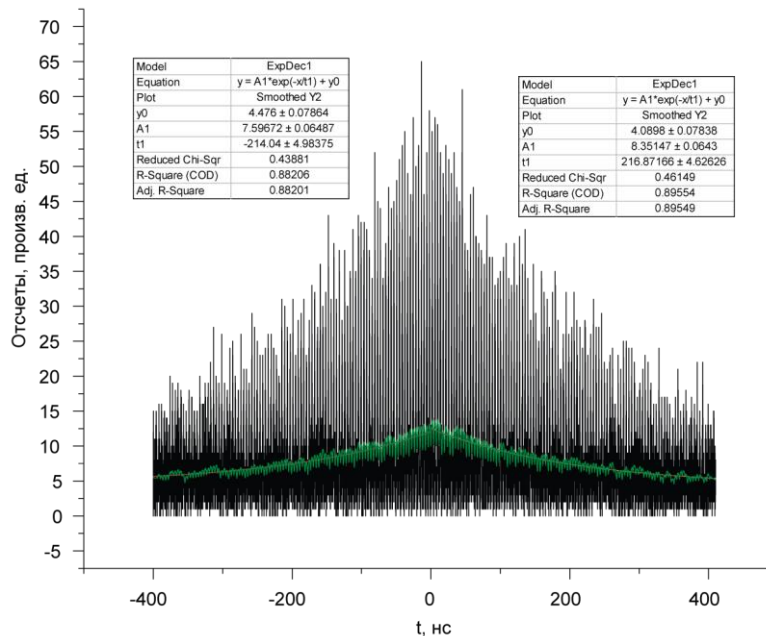


Рис. 3. Кросскорреляционная функция фотонов в случае использования эталона для дополнительной спектральной фильтрации

На рис. 3 кривой зеленого цвета представлена сглаженная кросскорреляционная функция, которая хорошо описывается экспоненциальным нарастанием/спадом с характерным временем ~ 215 нс. Это дает спектральную ширину одной моды излучения $\sim 1/2 \cdot \pi \cdot 215$ нс ≈ 740 кГц. Измеренная автокорреляционная функция дает значений числа продольных мод источника ~ 4 , что находится в хорошем согласии со спектром пар, полученным путем Фурье преобразования кросскорреляционной функции. Следующим важным параметром, характеризующим неклассичность света, является значение кросскорреляционной функции с оповещением $g^{(2)}(0)$. Измеряются скорости единичных отсчетов оповещения (heralding photons) S_H , скорости двойных совпадений SS_{HA} , SS_{HB} и

тройных совпадений $CC_{\text{НАВ}}$ для разных мощностей накачки. Далее вычисляется $g^{(2)}(0)$ следующим образом [14]:

$$g^{(2)}(0) = \frac{2C_{\text{H}}CC_{\text{НАВ}}}{(CC_{\text{НА}} + CC_{\text{НВ}})^2}. \quad (1)$$

Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значение $g^{(2)}(0)$ для различных мощностей накачки

Мощность накачки, мВт	$CC_{\text{НА}}$, Гц	$CC_{\text{НВ}}$, Гц	$CC_{\text{НАВ}}$, Гц	$g^{(2)}(0)$
30	147	180	1,5	0,44
20	59	72	0,4	0,41
10	14	17	0,032	0,25
5	5,6	7,2	0,0083	0,19

Видно, что для мощностей накачки 5 и 10 мВт $g^{(2)}(0) \ll 0.5$, что характеризует неклассический характер излучения с небольшим вкладом состояний с порядком выше чем 2 [15]. $CC_{\text{НА}} + CC_{\text{НВ}}$ представляет из себя величину равную средней частоте следования коррелированных фотонных пар. С учетом потерь на ввод излучения в оптоволокно (50%) и эффективность однофотонных детекторов (70%), для накачки в 5 мВт средняя частота следования коррелированных фотонных пар составляет 105 Гц. Это в свою очередь дает спектральную яркость источника коррелированных фотонных пар $\approx 13 \text{ Гц} \cdot \text{мВт}^{-1} \cdot \text{МГц}^{-1}$.

Заключение

Разработанный источник обеспечивает эффективную генерацию ярких поляризационно-запутанных фотонных пар в спектральном диапазоне переходов ионов $^{167}\text{Er}^{3+}$ в кристалле Y_2SiO_5 на телекоммуникационной длине волны, что является важным шагом к созданию квантового репитера с памятью для дальнедействующих оптоволоконных квантовых коммуникаций.

Благодарность

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России Рег. номер НИОКТР 121020400113-1.

Список источников

- [1] **Bouwmeester, D.** The Physics of Quantum Information / D. Bouwmeester, A. Ekert, A. Zeilinger. — Heidelberg: Springer Berlin, 2000. — 315 p.
- [2] **Hong, C.** Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference / C. Hong, Z. Ou, L. Mandel // Physical Review Letters. — 1987. — Vol. 59. — №18. — P. 2044–2046. — DOI:10.1103/PhysRevLett.59.2044.
- [3] **Kwiat, P.** New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs / P. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A. Sergienko, Y. Shin // Physical Review Letters. — 1995. — Vol. 75. — №24. — P. 4337–4341. — DOI:10.1103/PhysRevLett.75.4337.

- [4] **Fulconis, J.** Nonclassical interference and entanglement generation using a photonic crystal fiber pair photon source / J. Fulconis, O. Alibart, J. O'Brien, W. Wadsworth, J. Rarity // *Physical Review Letters*. — 2007. — Vol. 99. — P. 120501. — DOI:10.1103/PhysRevLett.99.120501.
- [5] **Migdall, A.** *Single-Photon Generation and Detection: Physics and Applications. Experimental Methods in the Physical Sciences* / A. Migdall, S. V. Polyakov, J. Fan, J. C. Bienfang. — Academic Press, 2013. — 616 p.
- [6] **Simon, C.** Quantum memories :A review based on the European integrated project"Qubit Applications (QAP)" / C. Simon, M. Afzelius, J. Appel, A. Boyer De La Giroday, S. Dewhurst, N. Gisin, C. Hu, F. Jelezko, S. Kroll, J. Muller, J. Nunn, E. Polzik, J. Rarity, H. De Riedmatten, W. Rossenfeld, A. Shields, N. Skold, R. Stevenson, R. Thew, I. Walmsley, M. Weber, H. Weinfurter, J. Wrachtrup, R. Young // *European Physical Journal D*. — 2010. — Vol. 58. — P. 1-22. — DOI:10.1140/epjd/e2010-00103-y.
- [7] **Slattery, O.** Background and review of cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion / O. Slattery, L. Ma, K. Zong, X. Tang // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. — 2019. — Vol. 124. — P. 124019. — DOI:10.6028/jres.124.019.
- [8] **Drever, R.** Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator / R. Drever, J. Hall, F. Kowalski, J. Hough, G. Ford, A. Munley, H. Ward // *Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry*. — 1983. — Vol. 31. — №2. — P. 97-105. — DOI:10.1007/BF00702605.
- [9] **Black, E.** An introduction to pound-drever-hall laser frequency stabilization / E. Black // *American Journal of Physics*. — 2001. — Vol. 69. — №1. — P. 79-87. — DOI:10.1119/1.1286663.
- [10] **Monteiro, F.** Narrowband photon pair source for quantum networks / F. Monteiro, A. Martin, B. Sanguinetti, H. Zbinden, R. Thew // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22. — №4. — P. 4371-4378. — DOI:10.1364/oe.22.004371.
- [11] **Pomarico, E.** Waveguide-based OPO source of entangled photon pairs / E. Pomarico, B. Sanguinetti, N. Gisin, R. Thew, H. Zbinden, G. Schreiber, A. Thomas, W. Sohler // *New Journal of Physics*. — 2009. — Vol. 11. — P. 113042. — DOI:10.1088/1367-2630/11/11/113042.
- [12] **Ahlich, A.** Bright source of indistinguishable photons based on cavity-enhanced parametric down-conversion utilizing the cluster effect / A. Ahlich, O. Benson // *Applied Physics Letters*. — 2016. — Vol. 108. — P. 021111. — DOI:10.1063/1.4939925.
- [13] **Moqanaki, A.** Novel single-mode narrow-band photon source of high brightness tuned to cesium D2 line / A. Moqanaki, F. Massa, P. Walther // *APL Photonics*. — 2019. — Vol. 4. — P. 090804. — DOI:10.1063/1.5095616.
- [14] **Wolfgramm, F.** Atomic quantum metrology with narrowband entangled and squeezed states of light / F. Wolfgramm. — Ph.D. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. — 2012. — 156 p.
- [15] **Rambach, M.** Sub-megahertz linewidth single photon source / M. Rambach, A. Nikolova, T. Weinhold, A. White // *APL Photonics*. — 2017. — Vol. 2. — P. 119901. — DOI:10.1063/1.4966915.

Narrowband source of entangled photon pairs in the telecommunications wavelength range for optical quantum memory and quantum repeater

K. I. Gerasimov, M. M. Minnegaliev, A. F. Khayrullin, S. A. Moiseev

Kazan Quantum Center, Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

A bright source of polarization-entangled photon pairs with a wavelength of $\sim 1.5 \mu\text{m}$ and a spectral width of $\sim 5 \text{ MHz}$ has been developed. The source operates on the basis of spontaneous parametric conversion in a periodically polarized KTP crystal placed in a high-Q optical ring cavity. The wavelength and spectral width of entangled photons are adapted to be stored in an optical quantum memory based on a $\text{Y}_2\text{SiO}_5:^{167}\text{Er}^{3+}$ crystal and an atomic frequency comb protocol.

Keywords: Polarization-entangled photon pairs, Quantum memory, Quantum repeater, Light conversion, Optical cavities, Narrow-band single-frequency lasers.

Реализация протокола оптической квантовой памяти на телекоммуникационной длине волны

К. И. Герасимов, М. М. Миннегалиев, С. А. Моисеев

Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

Экспериментально реализован протокол оптической квантовой памяти на основе восстановления сигнала подавленного эха (ROSE) в кристалле $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$. Достигнута эффективность восстановления $17\pm 1\%$ для ортогональных компонент поляризации сигнального импульса на телекоммуникационной длине волны при времени хранения 60 мкс. Входной импульс содержал в среднем ~ 38 фотонов, а восстановленный эхо-сигнал ~ 6 фотонов при отношении сигнал-шум ~ 1.3 .

Ключевые слова: Оптическая квантовая память, Редкоземельные ионы, Фотонное эхо, Квантовый репитер.

Цитирование: Герасимов, К. И. Реализация протокола оптической квантовой памяти на телекоммуникационной длине волны / К. И. Герасимов, М. М. Миннегалиев, С. А. Моисеев // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 299–301.

Разработка эффективной многокубитной оптической квантовой памяти (КП) на телекоммуникационной длине волны ($\lambda \sim 1,5$ мкм) является одной из ключевых задач оптических квантовых технологий, что вызывается большим интересом к созданию на ее основе квантового повторителя, используемого в оптических квантовых коммуникациях на дальние расстояния [1]. За последние два десятилетия были предложены различные протоколы эффективной КП [2,3]. Схема КП, основанная на использовании высокоэффективного обращенного фотонного эха в оптически плотной среде [4], нашла активное применение при разработке многочисленных протоколов ее реализации в кристаллах, активированных редкоземельными ионами [2]. Один из таких протоколов основан на восстановлении сигнала подавленного эха – протокол ROSE [5,6]. Протокол ROSE близок к классической схеме двухимпульсного (первичного) фотонного эха, где к последовательности возбуждающих импульсов добавляется второй рефазирующий импульс, который обеспечивает восстановление первичного сигнала эха в неинвертированной системе атомов, обеспечивая значительное подавление оптических шумов в восстановленном сигнальном импульсе по сравнению с протоколом первичного эха.

В данной работе мы экспериментально реализовали оптическую схему КП на основе протокола ROSE на телекоммуникационной длине волны для сигнальных световых полей с малым числом фотонов. Для этого была инициализирована долгоживущая (>1 с) искусственная линия поглощения и выбрана ортогональная геометрия распространения сигнального и рефазирующих полей. Такая геометрия является наиболее удобной при использовании резонатора для сигнального пучка [7], поскольку обеспечивает лучшую

пространственную изоляцию от рассеянных фотонов, возникающих в кристалле при воздействии рефразирующих лазерных импульсов. Линия искусственного поглощения инициализировалась на оптическом переходе ${}^4I_{15/2}(0)$ - ${}^4I_{13/2}(0)$ в кристалле ${}^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$, который находился в криостате замкнутого цикла при температуре 1,3К во внешнем магнитном поле 3,3 Тл, направленном вдоль оси D1 кристалла. В таких условиях, электронные спины ионов эрбия сильно выморожены, что приводит к большому времени жизни сверхтонких подуровней и времени когерентности. В этом случае, для снижения уровня шума, вызванного несовершенной реализацией рефразирующих импульсов, можно инициализировать долгоживущую искусственную линию поглощения на оптическом переходе [6], необходимую для реализации рассматриваемого протокола КП.

Эффективность восстановления реализованного протокола для ортогональных компонент поляризации сигнального импульса составила $17\pm 1\%$ при времени хранения 60 мкс. Входной импульс содержал в среднем ~ 38 фотонов, а эхо-сигнал ~ 6 фотонов при отношении сигнал/шум 1,3. Предлагаются и обсуждаются методы увеличения отношения сигнал/шум с целью реализации эффективной квантовой памяти для однофотонных световых полей на телекоммуникационной длине волны.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-00115).

Список источников

- [1] **Heshami, K.** Quantum memories: emerging applications and recent advances / K. Heshami, D. England, P. Humphreys, P. Bustard, V. Acosta, J. Nunn, and B. Sussman // *Journal of Modern Optics*. — 2016. — Vol 63. — № 20. — P. 2005–2028.
- [2] **Tittel, W.** Photon-echo quantum memory in solid state systems / W. Tittel, M. Afzelius, T. Chanelière, R. Cone, S. Kröll, S. Moiseev, and M. Sellars // *Laser & Photonics Reviews*. — 2009. — Vol 4. — № 2. — P. 244–267.
- [3] **Chanelière, T.** Quantum optical memory protocols in atomic ensembles / T. Chanelière, G. Hétet, and N. Sangouard // *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics*. — 2018. — Vol 67. — P. 77–150.
- [4] **Moiseev, S.** Complete reconstruction of the quantum state of a single-photon wave packet absorbed by a doppler-broadened transition / S. Moiseev and S. Kröll // *Physical Review Letters*. — 2001. — Vol 87. — № 17. — P. 137601.
- [5] **Damon, V.** Revival of silenced echo and quantum memory for light / V. Damon, M. Bonarota, A. Louchet-Chauvet, T. Chanelière, and J.-L. Le Gouët // *New Journal of Physics*. — 2011. — Vol 13. — № 9. — P. 093031.
- [6] **Minnegaliev, M.** Implementation of an optical quantum memory protocol in the ${}^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal / M. Minnegaliev, K. Gerasimov, T. Sabirov, R. Urmancheev, and S. Moiseev // *JETP Letters*. — 2022. — Vol. 115. — № 12. — P. 720–727.
- [7] **Minnegaliev, M.** Linear Stark effect in $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Tm}^{3+}$ crystal and its application in the addressable quantum memory protocol / M. Minnegaliev, K. Gerasimov, R. Urmancheev, A. Zheltikov, and S. Moiseev // *Physical Review B*. — 2021. — Vol 103. — № 17. — P. 174110.

Implementation of the optical quantum memory protocol at the telecommunication wavelength

K. I. Gerasimov, M. M. Minnegaliev, S. A. Moiseev

Kazan Quantum Center, Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

An optical quantum memory protocol based on the revival of a silenced echo (ROSE) signal in a $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal has been experimentally implemented. A recovery efficiency of $17 \pm 1\%$ was achieved for the orthogonal polarization components of a signal pulse at a telecommunication wavelength with a storage time of $60 \mu\text{s}$. The input pulse contained, on average ~ 38 photons, and the reconstructed echo signal contained ~ 6 photons at a signal-to-noise ratio of ~ 1.3 .

Keywords: Optical quantum memory, Rare-earth ions, Photon echo, Quantum repeater.

Алгоритм для программирования реконфигурируемого оптического интерферометра с произвольной архитектурой

С. С. Кузьмин^{1,2}, С. С. Страупе^{1,2}, И. В. Дьяконов^{1,2}, С. П. Кулик¹

¹ Центр Квантовых Технологий, Физический факультет, Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий», Москва, Россия

Ключевой особенностью современного интегрального линейного интерферометра является реконфигурируемость, которая позволяет устройству изменять своё влияние на входные оптические моды по требованию. Мы разработали эффективный алгоритм программирования линейного оптического интерферометра. Было использовано обучение с учителем численной модели. Обученная модель используется для быстрого нахождения требуемых фазовых сдвигов для заданного унитарного преобразования с использованием процедуры оптимизации, применяемой к модели, а не к физическому устройству. Нам удалось обучить модель интерферометра до 20 мод.

Ключевые слова: Линейная оптика, Линейно-оптические квантовые вычисления, Машинное обучение в линейной оптике.

Цитирование: Кузьмин, С. С. Алгоритм для программирования реконфигурируемого оптического интерферометра с произвольной архитектурой / С. С. Кузьмин, С. С. Страупе, И. В. Дьяконов, С. П. Кулик // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 302–306.

Введение

Линейные оптические интерферометры быстро стали незаменимым инструментом в квантовой оптике [1] и оптической обработке информации [2]. Ключевой особенностью современного интегрального линейного интерферометра является реконфигурируемость, которая позволяет устройству изменять свое влияние на входные оптические моды по требованию. Эта возможность сделала линейные оптические схемы особенно привлекательными для задач обработки информации. В частности, реконфигурируемые интерферометры являются основными компонентами современных экспериментов по линейным оптическим квантовым вычислениям [3] и рассматриваются как аппаратные ускорители для приложений глубокого обучения нейронных сетей [4].

Целью данной работы была разработка алгоритма обучения для построения архитектурно-независимой модели реконфигурируемого оптического интерферометра.

1. Мотивация

Актуальность данной работы обусловлена тем, что в настоящее время существует проблема программирования интерферометров различной архитектуры [5], которая не имеет простого аналитического описания и программирование таких устройств возможно только с использованием оптимизационных процедур. Процедура оптимизации настройки преобразования реального физического интерферометра требует экспериментального

выполнения ресурсоемкой процедуры восстановления матрицы преобразования (томографии) [6] на каждой итерации выбранного алгоритма оптимизации. С точки зрения конечного пользователя необходимость оптимизировать устройство каждый раз, когда необходимо изменить преобразование, неприемлема. Во-первых, оптимизация в многомерном пространстве параметров сама по себе является трудоемкой процедурой, требующей сложной настройки, и, кроме того, нет гарантии достижения глобального минимума. Во-вторых, алгоритмы, обеспечивающие быструю сходимость в задачах многопараметрической оптимизации, обычно основаны на градиенте, а точность оценки градиента целевой функции, реализуемой физическим устройством, ограничена шумом измерения.

2. Наш подход

В данной работе мы разработали эффективный алгоритм программирования линейного оптического интерферометра на примере архитектуры [5] (Рис. 1), поскольку она описывает любые интерферометры, содержащие независимые фазовращатели и светоделители. Мы использовали один из основных методов машинного обучения — обучение численной модели с учителем, который широко применяется при обучении нейронных сетей [7]. Модель интерферометра обучается с использованием набора унитарных шаблонов преобразования, соответствующих разным фазовым задержкам в плечах интерферометра. Обученная модель используется для быстрого нахождения требуемых фазовых сдвигов для заданного унитарного преобразования с использованием процедуры оптимизации, применяемой к модели, а не к физическому устройству.

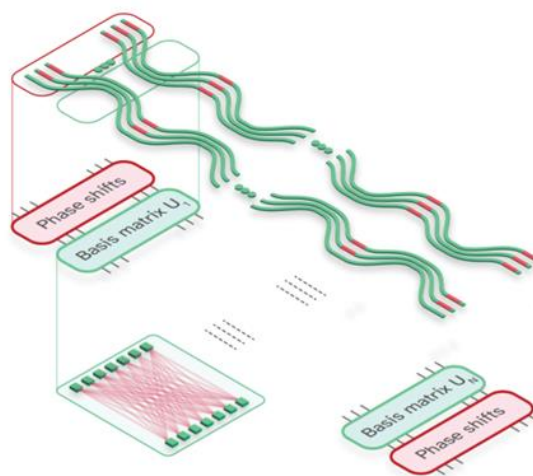


Рис. 1. Схема структуры многомодового интерферометра и схема его интегральной фотонной реализации. Базисные матрицы описывают распределение света между каналами интерферометра. Соответствующие интегрированные элементы могут быть реализованы в виде волноводных решеток, в которых волноводы связаны и, таким образом, энергия передается между разными волноводами.

Наш алгоритм обучения разбит на два этапа: этап обучения - поиск модели интерферометра с использованием обучающего набора унитарных преобразований и этап программирования - определение фазовых задержек модели интерферометра, соответствующих требуемому преобразованию. В работе также выведен точный аналитический алгоритм вычисления градиентов целевой функции, как для этапа обучения, так и для этапа программирования модели, что требует небольших вычислительных ресурсов.

3. Основные результаты

Результаты численного моделирования показали, что для интерферометра до 6 мод (Рис. 2) включительно алгоритм обучения работает без каких-либо априорных знаний об элементах внутренней структуры. С учетом априорных знаний алгоритм обучения работает для схемы до 20 режимов. В результате работы была написана библиотека на python для обучения модели (код доступен на GitLab <https://gitlab.com/SergeiKuzmin/nnoptic>).

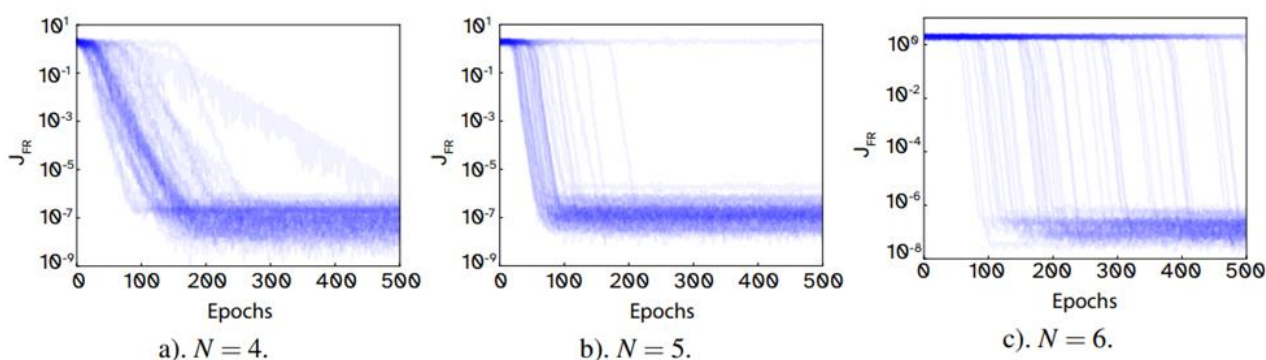


Рис. 2. Примеры обучения для разного количества оптических мод N . Мы строим функциональную сходимость Фробениуса на тестовом наборе данных по номеру эпохи для 50 различных экземпляров алгоритма оптимизации (для каждого экземпляра мы случайным образом выбирали исходные базисные матрицы). Случай а) - количество оптических мод $N = 4$, размер обучающей выборки $M = 7$, б) - $N = 5$, $M = 30$, в) - $N = 6$, $M = 230$.

Заключение

Продемонстрированный подход к программированию интерферометров отличается несколькими важными преимуществами. Прежде всего метод не зависит от архитектуры интерферометра. Это означает, что и суть алгоритма, и математическая структура подходят для любой выбранной архитектуры. Это предположение остается в силе, если смесители мод и фазовращатели не рассматриваются как независимые элементы. Затем на выходе алгоритма обучения получается полная модель интерферометра с учетом преобразования элементов смещения мод в изготовленном устройстве. Наконец, представленный алгоритм представляет собой процедуру реконструкции внутренних фиксированных оптических элементов сложной интерферометрической схемы. Следовательно, его можно использовать

для исследования качества оптических подходов, расположенных внутри большей оптической схемы.

Узкие места предлагаемого алгоритма связаны с экспериментальными проблемами. Метрика Фробениуса требует точного измерения модуля и фазы унитарных элементов. Другая проблема, которая не охватывается нашим алгоритмом, возникает из-за перекрестных помех между фазовращателями. Наша структура предполагает, что фазы в разных путях активируются независимо, что не так из-за перекрестных помех между различными элементами фазовой модуляции. К счастью, реализации встроенного фотонного модулятора обычно демонстрируют чрезвычайно низкие перекрестные помехи.

Мы считаем, что наши результаты откроют возможности для использования новых архитектур программируемых оптических интерферометров как для классических, так и для квантовых приложений. Более подробное изложение этих идей вы можете прочитать в [8].

Благодарность

Работа поддержана госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной Карты Квантовые Вычисления (Договор No. 868-1.3-15/15-2021 от 5.10.2021 и No. P2154 от 24.11.2021).

Список источников

- [1] **Carolan, J.** Universal linear optics / J. Carolan, C. Harrold, C. Sparrow, E. Martin-Lopez, N. J. Russell, J. W. Silverstone, P. J. Shadbolt, N. Matsuda, M. Oguma, M. Itoh, G. D. Marshall, M. G. Thompson, J. C. F. Matthews, T. Hashimoto, J. L. O'Brien, A. Laing // *Science*. — 2015. — Vol. 349. — № 6249. — P. 711-716.
- [2] **Harris, N. C.** Linear programmable nanophotonic processors / N. Harris, J. Carolan, D. Bunandar, M. Prabhu, M. Hochberg, T. Baehr-Jones, M. L. Fanto, A. Matthew Smith, C. C. Tison, P. M. Alsing, D. Englund // *Optica*. — 2018. — Vol. 5. — № 12. — P. 1623-1631.
- [3] **Wang, J.** Multidimensional quantum entanglement with large-scale integrated optics / J. Wang, S. Paesani, Y. Ding, R. Santagati, P. Skrzypczyk, A. Salavrakos, J. Tura, R. Augusiak, L. Mancinska, D. Bacco, D. Bonneau, J. W. Silverstone, Q. Gong, A. Acin, K. Rottwitt, L. K. Oxenlowe, J. L. O'Brien, A. Laing, M. G. Thomson // *Science*. — 2018. — Vol. 360. — № 6386. — P. 285-291.
- [4] **Hamerly, R.** Large-scale optical neural networks based on photoelectric multiplication / R. Hamerly, L. Bernstein, A. Sludds, M. Soljacic, D. Englund // *Physical Review X*. — 2019. — Vol 9. — № 2. — P. 021032.
- [5] **Saygin, M. Y.** Robust architecture for programmable universal unitaries / M. Y. Saygin, I. V. Kondratyev, I. V. Dyakonov, S. A. Mironov, S. S. Straupe, S. P. Kulik // *Physical review letters*. — 2020. — Vol. 124. — № 1. — P. 010501.
- [6] **Tillman, M.** On unitary reconstruction of linear optical networks / M. Tillman, C. Schmidt, P. Walther // *Journal of Optics*. — 2016. — Vol. 18. — № 11. — P. 114002.
- [7] **Ferrari, S.** Smooth function approximation using neural networks / S. Ferrari, R. Stengel // *IEEE Transactions on Neural Networks*. — 2005. — Vol. 16. — № 1. — P. 24-38.
- [8] **Kuzmin, S.** Architecture agnostic algorithm for reconfigurable optical interferometer programming / S. Kuzmin, I. Dyakonov, S. Kulik // *Optics Express*. — 2021. — Vol. 29. — № 23. — P. 38429-38440.

Architecture agnostic algorithm for reconfigurable optical interferometer programming

S. S. Kuzmin, S. S. Straupe, I. V. Dyakonov, S. P. Kulik

Center for Quantum Technologies, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

A key feature of a modern integrated linear interferometer is reconfigurability, which allows the device to change its influence on input optical modes on demand. We have developed an efficient programming algorithm for a linear optical interferometer. Supervised learning of the numerical model was used. The trained model is used to quickly find the required phase shifts for a given unitary transform using an optimization procedure applied to the model rather than the physical device. We managed to train the interferometer model up to 20 modes.

Keywords: Linear optics, Linear optical quantum computing, Machine learning in linear optics.

Генерация состояний Белла с оповещением на интегрально-оптическом чипе из стекла

*Н. Н. Скрябин¹, И. В. Кондратьев¹, М. А. Дрязгов¹, Ю. А. Бирюков¹, С. А. Журавицкий¹,
С. А. Флджян^{1,2}, И. В. Дьяконов^{1,2}, М. Ю. Сайгин¹, К. В. Тараторин¹, А. А. Корнеев¹,
С. П. Кулик¹, С. С. Страупе^{1,2}*

¹ Центр квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Российский квантовый центр, Москва, Россия

В нашей работе мы экспериментально генерируем двухкубитные фотонные состояния Белла с помощью одиночных фотонов и интегрально-оптического чипа. Чип был изготовлен с использованием технологии фемтосекундной лазерной записи в образце кварцевого стекла и классически охарактеризован с использованием непрерывного диодного лазера. Четыре одиночных фотона генерировались демультимплексированием источника на базе квантовой точки и заводились в 8-модовую волноводную схему чипа. Выходные фотоны регистрировались с помощью однофотонных детекторов на сверхпроводящих нанопроволоках. Качество сгенерированного двухкубитного состояния Белла было охарактеризовано с помощью стандартной процедуры томографии квантового состояния и реконструкции матрицы плотности.

Ключевые слова: Одиночные фотоны, Интегрально-оптический чип, Фемтосекундная лазерная запись, Состояние Белла.

Цитирование: Скрябин, Н. Н. Генерация состояний Белла с оповещением на интегрально-оптическом чипе из стекла / Н. Н. Скрябин, И. В. Кондратьев, М. А. Дрязгов, Ю. А. Бирюков, С. А. Журавицкий, С. А. Флджян, И. В. Дьяконов, М. Ю. Сайгин, К. В. Тараторин, А. А. Корнеев, С. П. Кулик и С. С. Страупе // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 307–310.

Для задач квантовой обработки информации необходимо использовать запутанные состояния кубитов. Простейшим состоянием такого типа являются состояния Белла. В линейной оптике с использованием двухрельсовой кодировки невозможно детерминированное приготовление таких состояний из одиночных фотонов: возможно лишь приготовление суперпозиции состояний Белла и факторизованных состояний [1]. По этой причине необходимо использование схем с оповещением [2] или постселекцией [3]. В схемах с постселекцией часть регистрируемых событий игнорируется, однако такой подход плохо работает при усложнении схемы, когда генератор состояний находится внутри большой схемы. Схемы с оповещением используются сигнальные и вспомогательные фотоны и моды. Регистрация определённых конфигураций фотоотсчётов во вспомогательных каналах позволяет детерминировано утверждать, что оставшиеся фотоны находятся в требуемом состоянии, и использовать эти состояния в дальнейшем. Так как оповещение производится путём детектирования части фотонов, то использования двух фотонов для приготовления белловских состояний недостаточно. Было показано, что это невозможно и с использованием трёх фотонов, а наличие четырёх одиночных фотонов является оптимальным для данной

задачи [1]. В этой работе для генерации состояний Белла в двухрельсовой кодировке используется восьмиканальная схема с четырьмя одиночными фотонами на входе [4].

Интегрально-оптический чип был изготовлен с помощью технологии фемтосекундной лазерной записи в образце кварцевого стекла длиной 5 см. Волноводная схема фотонного чипа показана на Рис. 1а. Четыре вспомогательных моды расположены в середине, по две сигнальных моды расположены по краям. Преобразования Адамара $H^{(2)}$ реализованы в виде вертикальных направленных ответвителей 50:50. Преобразование Адамара $H^{(4)}$ (показано синим цветом) реализовано с помощью четырёх направленных ответвителей 50:50 и одного 0:100. Однокубитные операции R_x выполнены в виде интерферометра Маха-Цандера, который состоит из двух сбалансированных направленных ответвителей и одного фазовращателя, а операция R_z - в виде одного фазовращателя. Фазовращатели реализованы в виде термо-оптических переключателей. Для генерации состояний Белла четыре одиночных фотона заводятся в сигнальные моды и регистрируются фотоны, выходящие из вспомогательных мод, в фоковском базисе. При регистрации состояний 0110, 1001, 1010, 0101 представленная схема обеспечивает генерацию двухкубитного состояния Белла с вероятностью успеха $p = 1/8$.

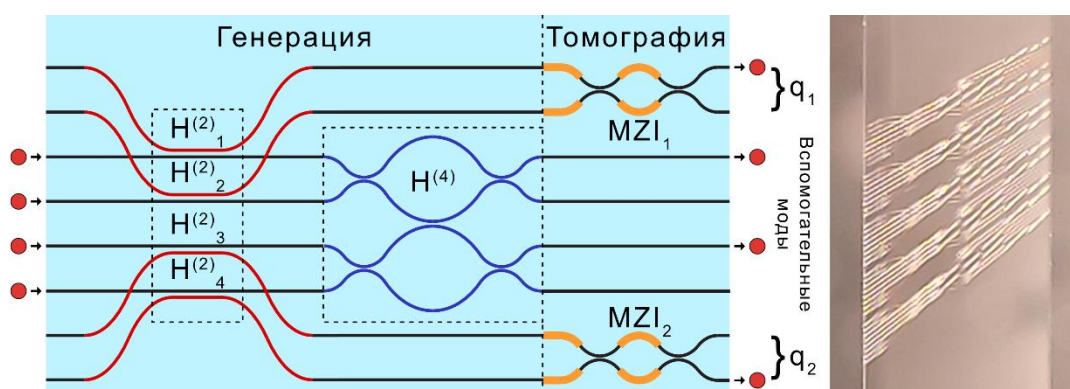


Рис. 1. Волноводная схема фотонного чипа для генерации запутанных состояний Белла. (б) Фотография образца с пятью записанными волноводными схемами (вид с торца под углом).

Для классической характеристики используется метод восстановления унитарной матрицы преобразования оптического чипа, предложенный в [5]. Полученная матрица преобразования вместе с теоретической приведена на рисунке 2. Фиделити между матрицами составляет $F = 98\%$. Полные потери во всех четырех внутренних оптических модах находятся в диапазоне < 6 дБ.

Эксперимент в квантовом режиме был проведен с использованием источника фотонов демультиплексированной квантовой точки [6] и коммерчески доступными детекторами одиночных фотонов на сверхпроводящих нанопроволоках (Scotel). Измеренная яркость квантовой точки составила 6 МГц на центральной длине волны 918,9 нм с $g^{(2)}(0) = 0,018$. 4-фотонная яркость при этом составляла 100 Гц. Средняя попарная неразличимость фотонов, измеренная с помощью квантовой интерференции (ХОМ провал) на волоконном делителе,

составила 0,91. Качество сгенерированного двухкубитного состояния Белла было охарактеризовано с помощью стандартной процедуры томографии квантового состояния и реконструкции матрицы плотности.

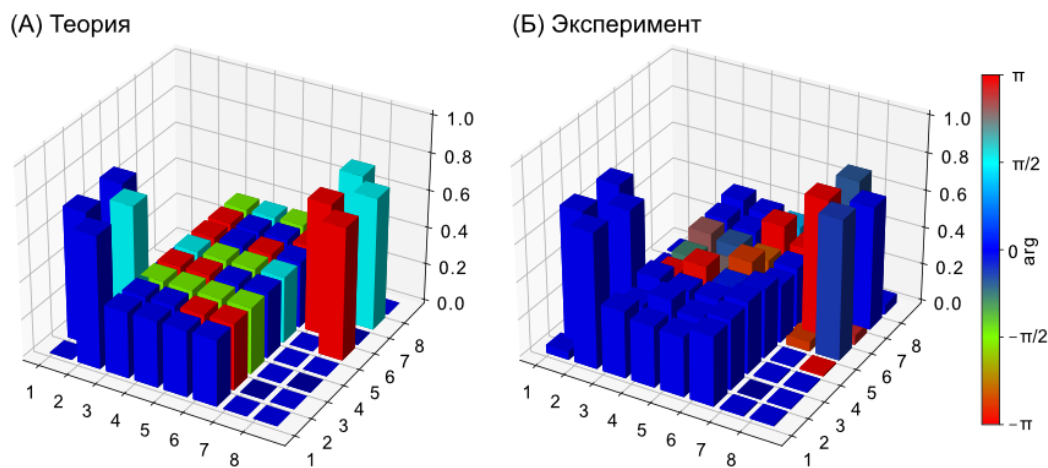


Рис. 2. (А) Теоретическая матрица преобразования U оптического чипа с действительными первой строкой и первым столбцом. (Б) Экспериментально полученная матрица U преобразования оптического чипа. Значения фаз в матрице изображены цветом.

Благодарность

Работа поддержана госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной Карты Квантовые Вычисления (Договор No. 868-1.3-15/15-2021 от 5.10.2021 и No. P2154 от 24.11.2021). Работа также выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (РНФ) грант No. 22-12-00353.

Список источников

- [1] **Stanisic, S.** Generating entanglement with linear optics / N. Linden, A. Montanaro, P. S. Turner // Physical Review A. – 2017. – Vol. 96. – №. 4. – P. 043861.
- [2] **Fldzhyan, S. A.** Compact linear optical scheme for Bell state generation / S. A. Fldzhyan, M. Y. Saygin, S. P. Kulik // Physical Review Research. – 2021. – Vol. 3. – №. 4. – P. 043031.
- [3] **Ralph, T. C.** Linear optical controlled-NOT gate in the coincidence basis / T. C. Ralph, N. K. Langford, T. B. Bell, A. G. White // Physical Review A. – 2002. – Vol. 65. – №. 6. – P. 062324.
- [4] **Zhang, Q.** Demonstration of a scheme for the generation of “event-ready” entangled photon pairs from a single-photon source / Q. Zhang, X.H. Bao, C.Y. Lu, X-Q Zhou, T. Yang, T. Rudolph, and J.-W. Pan // Physical Review A. – 2008. – Vol. 77. – №. 6. – P. 043861.
- [5] **Heilmann, R.** A novel integrated quantum circuit for high-order W-state generation and its highly precise characterization / R. Heilmann, M. Gräfe, S. Nolte, A. Szameit // Science bulletin. – 2015. – Vol. 60. – №. 1. – P. 96-100.
- [6] **Rakhlin, M. V.** Demultiplexed single-photon source with a quantum dot coupled to microresonator / M. V. Rakhlin, A. I. Galimov, I. V. Dyakonov, N. N. Skryabin, G. V. Klimko, M. M. Kulagina, Yu. M. Zadiranov, S. V. Sorokin, I. V. Sedova, Yu. A. Guseva, D. S. Berezina, Yu. M. Serov, N. A. Maleev, A. G. Kuzmenkov, S. I. Troshkov, K. V. Taratorin, A. K. Skalkin, S. S. Straupe, S. P. Kulik, T. V. Shubina, A. A. Toropov // Journal of Luminescence. – 2023. – Vol. 253. – P. 119496.

Heralded Bell-state generation in a photonic integrated glass chip

*N. N. Skryabin¹, I. V. Kondratyev¹, M. A. Dryazgov¹, Yu. A. Biriukov¹, S. A. Zhuravitskiy¹,
S. A. Fldzhyan¹, I. V. Dyakonov¹, M. Yu. Saygin¹, K. V. Taratorin¹, A. A. Korneev¹, S. P. Kulik¹,
S. S. Straupe^{1,2}*

¹ Technology Centre, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Russian Quantum Center, Moscow, Russia

In our work we experimentally generate photonic two-qubit Bell-states by means of single photons and an integrated glass chip. The photonic chip was fabricated via the femtosecond laser writing technology in fused silica glass sample and characterized classically using a CW diode laser. Four single photons were generated by the demultiplexed quantum dot source and injected into the 8-mode waveguide scheme of the chip. Output photons from the chip were registered using superconducting nanowire single-photon detectors. The quality of the generated two-qubit Bell-state was and characterized via a standard quantum state tomography routine and reconstructing the density matrix.

Keywords: Single photons, Photonic integrated chip, Femtosecond laser writing, Bell-state.

Дополнительные и низкозатратные возможности серийного формообразования оптических поверхностей методом прецизионного реплицирования на основе использования малоусадочных полимерных композиций холодного отверждения

А. В. Лукин¹, А. Н. Мельников¹, Е. Г. Лисова¹, А. И. Садрутдинов¹, Н. А. Гурин^{2,3}

¹ Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия;

² Акционерное общество «Новосибирский приборостроительный завод», Новосибирск, Россия;

³ Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

В докладе рассматриваются дополнительные и низкозатратные возможности серийного формообразования оптических поверхностей методом прецизионного реплицирования на основе использования малоусадочных полимерных композиций холодного отверждения. В качестве иллюстрации приводится пример изготовления комбинированного оптического элемента с асферической рабочей поверхностью.

Ключевые слова: Оптическая поверхность, Серийное производство, Метод прецизионного реплицирования, Малоусадочная полимерная композиция холодного отверждения.

Цитирование: Лукин, А. В. Дополнительные и низкозатратные возможности серийного формообразования оптических поверхностей методом прецизионного реплицирования на основе использования малоусадочных полимерных композиций холодного отверждения / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, Е. Г. Лисова, А. И. Садрутдинов, Н. А. Гурин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 311–314.

В результате значительного роста в последние годы потребностей рынка оптики и фотоники в объективах различного назначения для широкой спектральной области (смартфоны, планшеты, цифровые фотоаппараты, видеопроекторы, системы видеонаблюдения и безопасности, оптические приборы для дистанционного зондирования Земли и др.) возникла необходимость существенного увеличения производительности, повышения точности, оптимизации затрат и снижения себестоимости изготовления базовых оптических элементов [1, 2].

Эта актуальная проблема может быть кардинально решена путем организации серийного и массового производства оптических элементов с рабочими поверхностями любого вида (плоские, сферические, асферические, а также «free-form») на основе низкозатратной технологии прецизионного реплицирования с использованием полимерных композиций холодного отверждения [3 – 8]. При этом получают так называемые комбинированные оптические элементы (КОЭ), состоящие, как правило, из стеклянной основы с относительно тонким одним или двумя слоями полимера, которые имеют внешние поверхности заданной

формы. Использование малоусадочных полимерных композиций холодного отверждения гарантирует:

- отсутствие термических деформаций у подложек;
- высокую идентичность однотипных КОЭ в каждой партии.

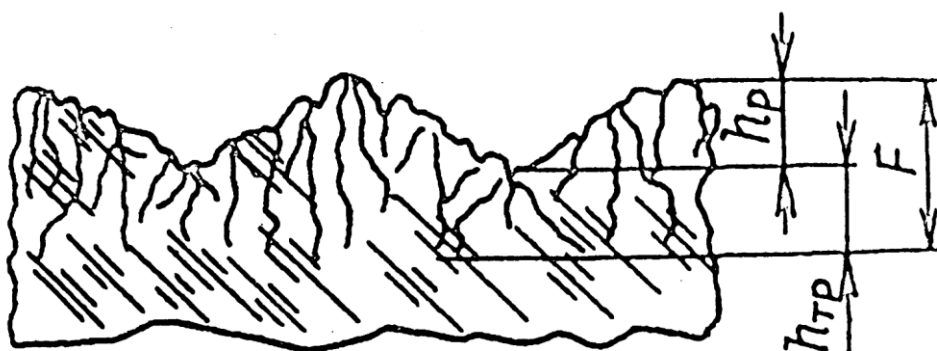
КОЭ обладают высокими механическими и оптическими свойствами «стеклянной» оптики, но при этом себестоимость их серийного и массового изготовления многократно ниже. В качестве иллюстрации приводится пример изготовления КОЭ с асферической рабочей поверхностью.

Нами установлено, что по форме поверхности ($N, \Delta N$), классу чистоты (P) и параметрам шероховатости (R_z, R_a) реплицированные поверхности идентичны рабочей поверхности их мастер-матрицы. Кроме того, по сохраняемости и стойкости к климатическим воздействиям КОЭ практически не уступают соответствующим «чисто» стеклянным аналогам, что было установлено по результатам проведения многократных комплексных испытаний различных типов КОЭ в течение многих лет [8].

В данной работе рассматриваются такие дополнительные возможности низкочестного получения КОЭ, как:

- восстановление оптических элементов из брака по форме поверхности ($N, \Delta N$), классу чистоты (P), параметрам шероховатости (R_z, R_a) и «провалу» по толщине¹;
- реплицирование на подложки с мелко-, средне- и грубошлифованными рабочими поверхностями.

При этом мы предположили, что *побочным, но исключительно ценным и важным*, технологическим эффектом может быть возможность снижения или полного исключения негативного влияния трещиноватого слоя [2, 9 – 11]. На рис. 1 приведено схематическое изображение его структуры, характерное для оптических стекол, шлифованных свободным абразивом [9].



h_p — рельефный слой, $h_{тр}$ — трещиноватый слой, F — нарушенный слой

Рис. 1. Строение поверхности стекла, разрушенной шлифующим абразивом [4]

Предлагаем не избавляться от него путем трудоемкой технологии ГШП (глубокая шлифовка и полировка), как это принято в современном оптическом производстве [9], а *нейтрализовать* его вредоносные свойства на начальной стадии реплицирования, в том

¹Первые результаты по реализации этой возможности представлены в нашей работе [4].

числе за счет использования капиллярных свойств рельефа и микротрещин нарушенного слоя.

Формообразование оптических поверхностей методом прецизионного реплицирования открывает возможность снижения или полного исключения негативного влияния нарушенного слоя. При этом оказывается возможным использование подложек с мелко-, средне- и даже грубошлифованными рабочими поверхностями. Это, очевидно, обеспечивает существенное снижение трудоемкости и себестоимости процесса формообразования оптических поверхностей подложек КОЭ.

В качестве иллюстрации на рис. 2 представлены микрофотографии двух плоских грубошлифованных (использовался абразивный шлиф-порошок М100) образцов из стекла марки К8. На один из них было произведено реплицирование с высококачественной плоской мастер-матрицы (её общее отклонение от плоскостности $N < 0,1$ интерференционной полосы; местное отклонение от плоскостности $\Delta N < 0,05$ интерференционной полосы). Видно, что качество его реплицированной рабочей поверхности достаточно высокое, хотя и заметны местные отклонения $\sim 0,5$ интерференционной полосы, наличие которых, по-видимому, объясняется влиянием исходного (до процесса реплицирования) большого отклонения этой грубошлифованной поверхности от плоскостности и влиянием остаточной усадки полимера.



а) поверхность после грубой шлифовки (обработка шлиф-порошком М100)



б) реплицированная поверхность (с использованием малоусадочной фотополимерной композиции)

Рис. 2. Фотоснимки, полученные в микроинтерферометре Линника

В настоящее время работы по данному научно-технологическому направлению продолжают в части разработок и их реализации в оптическом производстве.

Список источников

- [1] **Photonics. Industry Report 2013. Key Data** // Электрон. дан. — ЕС, 2013. — Заглавие с экрана. — Режим доступа: http://www.photonics21.org/download/Photonics_industry_report_2013/photronics_industry_report_2013.pdf.
- [2] **Развитие фотоники в России и мире:** публичн. аналит. доклад / Под рук. д-ра экон. наук И.Г. Дежиной. — М.: Битуби, 2016. — 432 с.

- [3] **Лукин, А. В.** Реплицированная асферическая оптика: основные аспекты организации серийного и массового производства / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, М. М. Ахметов, А. В. Берденников, И. С. Гайнутдинов, А. В. Жданова, В. П. Иванов, Е. Г. Лисова, И. А. Могилюк // Контенант. — 2017. — Том 16. — № 2. — С. 167–172.
- [4] **Лукин, А. В.** Опыт применения технологии прецизионного реплицирования для восстановления оптических деталей из брака при серийном производстве / А. В. Лукин, Н. А. Гурин, А. Н. Мельников, Е. Г. Лисова, А. А. Свистунова // Оптический журнал. — 2023. — Том 90. — № 7. — С. 107–115. — DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-07-107-115
- [5] **Серова, В. Н.** Полимерные оптические материалы / В. Н. Серова. — СПб.: Изд-во НОТ, 2015. — 382 с.
- [6] **Патент на изобретение № 2722622 РФ.** Способ изготовления комбинированного оптического элемента / А. В. Лукин, А. Н. Мельников. — Заяв. 17.09.2019. — Оpubл. 02.06.2020.
- [7] **Бейнарович, Л. Н.** Изготовление крупногабаритных зеркал из полимеров методом копирования / Л. Н. Бейнарович, Э. А. Салимова, В. П. Мартынов // Оптико-механическая промышленность. — 1971. — № 10. — С. 41–44.
- [8] **Лукин, А. В.** Прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей – научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 42–50. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-42-50
- [9] **Окатов, М. А.** Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов, Э. А. Антонов, А. Байгожин и др.; Под ред. М. А. Окатова. — СПб.: Политехника, 2004. — 679 с.
- [10] **Захаревич, Е. М.** Современные направления и тенденции в области обработки оптических материалов / Е. М. Захаревич, М. А. Шавва // Лазер-Информ. — 2021. — № 4 (691). — С.1–3.
- [11] **ОСТ 3–6043–86** Заготовки оптических деталей. Припуски на обработку глубоким шлифованием и глубоким полированием. — М.: Изд-во ЦНИИ «Комплекс», 1986. — 9 с.

Additional and low-cost possibilities of serial shaping of optical surfaces via precision replication method based on the use of low-shrinkage cold-setting polymer compounds

A. V. Lukin¹, A. N. Melnikov¹, E. G. Lisova¹, A. I. Sadrutdinov¹, N. A. Gurin^{2,3}

¹ JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

² JSC “Novosibirsk Instrument-Building Plant”, Novosibirsk, Russia

³ Institute of Automatics and Electrometry of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

This report considers additional and low-cost possibilities of serial shaping of optical surfaces via precision replication method based on the use of low-shrinkage cold-setting polymer compounds. As an illustration, an example of a combined optical element with an aspherical working surface is given.

Keywords: Optical surface, Serial production, Precision replication method, Low-shrinkage cold-setting polymer compound.

Микроструктурированная Pd/PdO нанопленка как сенсорный элемент на водород

А. В. Шелаев¹, Д. П. Куликова^{1,2}, А. В. Барышев¹

¹ ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Для водородной энергетики требуется дешевые и высокоточные оптические сенсоры на H₂. Оксид палладия восстанавливается в водородной атмосфере вследствие автокаталитической реакции, характеризующейся медленной константой скорости, а палладий в структурах Pd/PdO значительно повышает скорость отклика и чувствительность. В работе для формирования Pd/PdO структур использовался сфокусированный пучок непрерывного лазера, при этом исходная нанопленка Pd локально окислялась с образованием периодических областей PdO в перетяжке пучка. Отклик детектировался «на отражение». Для сенсорного элемента с оптимальной структурой, достигалось уменьшение времени оптического отклика более чем в 1000 раз. Относительную интенсивность отклика удастся значительно повысить, используя наноструктуру Pd/PdO как дифракционную решетку и детектируя сигнал в первом дифракционном порядке.

Ключевые слова: Оптические сенсоры, Лазерная литография, Дифракционная решетка.

Цитирование: Шелаев, А. В. Микроструктурированная Pd/PdO нанопленка как сенсорный элемент на водород / А. В. Шелаев, Д. П. Куликова, А. В. Барышев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 315–317.

Широкое распространение водородной энергетики требует производства дешевых и высокоточных сенсоров на H₂, чтобы обнаруживать утечки, а также чтобы избежать возможного вредного воздействия высоких концентраций водорода. Оптические датчики на водород предпочтительны по сравнению с электрическими, так как не содержат электрические контакты и исключают появление искр, что в водородсодержащей атмосфере может привести к разрушительным последствиям. Известно, что PdO восстанавливается водородом, но времена отклика значительны (часы) и чувствительность к водороду в воздухе невелика (единицы объемных процентов). Таким образом, требовалось найти способы повышения скорости отклика и увеличения чувствительности.

Известно, что эффект каталитического разложения молекулярного водорода на атомарный на поверхности Pd приводит к значительному повышению чувствительности и росту скорости реакции восстановления PdO. В нашей работе предложено для формирования PdO на поверхности 20 нм пленки Pd использовать сфокусированный пучок непрерывного лазера, который в воздушной атмосфере нагревал Pd до температуры более 400 °С, что приводило к локальному окислению. Двигаясь по заданной траектории лазер «записывал» периодические полосы из PdO на поверхности Pd. В качестве оптического отклика детектировать спектры отражения. Для определения оптимальных параметров

варьировалась мощность лазера и период полос изготовленных структур. Спектры отражения измерялись при воздействии различных концентраций H_2 в воздухе. Оптимизированные микроструктуры PdO/Pd демонстрируют отклик вплоть до 0,05 об. % H_2 в воздухе. Время отклика на концентрацию 2 об. % водорода в воздухе составило 10 секунд, что в 1000 раз быстрее чем отклик пленки PdO на ту же концентрацию. Показана также зависимость скорости отклика от концентрации H_2 для диапазона 0,025-4 об. % (рис. 1). Для повышения амплитуды отклика, предложено использовать структурированную пленку с заданным периодом структур в качестве дифракционной решетки и детектировать отклик в первом порядке при освещении лазерным излучением. Под действием водорода в атмосфере контраст полос Pd/PdO снижается и как следствие, решетка работает с меньшей эффективностью.

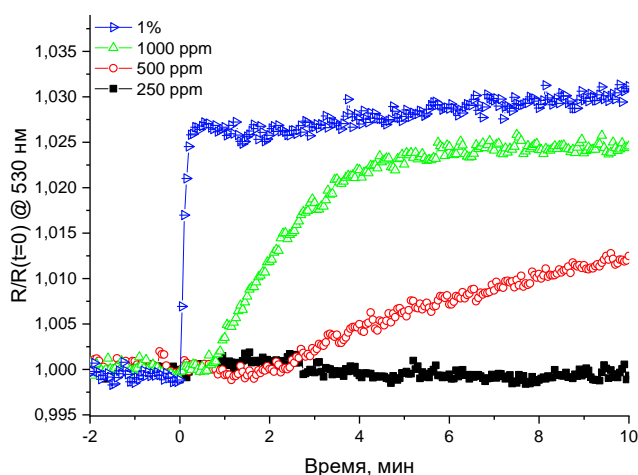


Рис. 1. Отклик сенсорного элемента на водород.

Таким образом, показано, что тонкую пленку Pd можно структурировать с помощью лазерного излучения и получить чувствительный элемент для оптического сенсора водорода с чувствительностью вплоть до 0,05 об. % водорода в воздухе.

Microstructured Pd/PdO nanofilm as sensor element to hydrogen

A. V. Shelaev¹, D. P. Kulikova^{1,2}, A. V. Baryshev¹

¹ Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Hydrogen energy requires cheap and high-precision optical sensors based on H_2 . Palladium oxide is reduced in a hydrogen atmosphere due to an autocatalytic reaction characterized by a slow rate constant, while palladium in Pd/PdO structures greatly improves response speed and sensitivity. In this work, a focused cw laser beam was used to form Pd/PdO structures; in this case, the initial Pd nanofilm was locally oxidized with the formation of periodic PdO regions in the beam waist. The response was detected in the reflection mode. By optimizing the structure of the sensor element, the optical response time was reduced by more than 1000 times. The relative intensity of the

response can be significantly increased by using the Pd/PdO nanostructure as a diffraction grating and by detecting the signal in the first diffraction order.

Keywords: Optical sensor, Laser lithography, Diffraction grating.

Лазерная запись силицидных структур на плёнках Ti с покровным слоем Si

Д. А. Белоусов, Р. И. Куц, В. П. Корольков

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты исследования термохимической технологии лазерной записи масок на плёнках титана с тонким покровным слоем кремния. Слой Si выполняет три функции: защищает плёнку титана от медленного окисления в воздухе, увеличивает поглощение лазерного излучения, участвует в реакции образования химически стойкого силицида. Предлагаемая технология позволяет увеличить скорость и диапазон мощности лазерной записи дифракционных структур по сравнению с записью на однослойных плёнках титана. Предложено объяснение обнаруженного эффекта аномального фазового сдвига между выступами и канавками записанных отражательных решёток, зависящего от скорости сканирования пучка и толщины слоя Si.

Ключевые слова: Термохимическая технология, Прямая лазерная запись, Тонкие плёнки металлов, Покровный слой, Коэффициент поглощения, Дифракционная оптика.

Цитирование: Белоусов, Д. А. Лазерная запись силицидных структур на плёнках Ti с покровным слоем Si / Д. А. Белоусов, Р. И. Куц, В. П. Корольков // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 318–323.

Введение

В настоящее время элементы дифракционной оптики и нанофотоники, представляющие собой оптические подложки с микро- и нанорельефом поверхности широко используются в различных промышленных и научных приложениях. Одним из методов формирования поверхностного рельефа рабочей структуры данных элементов является термохимическая лазерная технология, которая основана на локальном окислении тонкой металлической пленки (за счет ее локального нагрева под действием лазера) с последующим травлением неокисленного участка. В качестве регистрирующего материала для данной технологии, как правило, используют пленки хрома, но могут применяться и другие металлические пленочные покрытия. В частности, в настоящее время активно исследуется использование пленок титана [1, 2]. Однако существенным недостатком титановых пленок для лазерной записи является нестабильность их характеристик из-за постепенного окисления при хранении. Для решения этой проблемы, поверх плёнки титана можно напылять тонкий покровный слой другого материала, например кремния [3, 4]. Однако в таком случае помимо защитной функции покровный слой кремния при нагреве сфокусированным лазерным пучком также участвует в термохимической реакции и, в частности, стимулирует образование силицида титана на границе кремний-титан [4]. В докладе представлены результаты исследования термохимической технологии формирования силицидных масок на плёнках титана методом термохимической лазерной записи на двухслойных плёнках кремний/титан (Si/Ti).

Термохимическая лазерная запись на плёнках Ti с покровным слоем

Si

Толщина покровного слоя кремния имеет важное значение при термохимической лазерной записи на двухслойных плёнках Si/Ti [3, 4]. Например, при толщине слоя Si ~5 нм отражение двухслойной пленки будет минимально на длине волны 405 нм, а при толщине ~10 нм на длине волны 532 нм [4].

В данной работе для записи тестовых структур на плёнках Si/Ti использовались установка ХУ-лазерной нанолитографии (длина волны лазерного записывающего пучка $\lambda = 405$ нм) [5] и круговая лазерная записывающая система ($\lambda = 532$ нм) [6]. Для экспериментов были изготовлены образцы однослойной плёнки Ti (Образец #1) и двухслойных плёнок Si/Ti (Образец #2 и Образец #3). Для двухслойных плёнок Si/Ti толщина покровного слоя кремния подбиралась с целью увеличения поглощения на соответствующей длине волны лазерного записывающего пучка (405 нм и 532 нм). На рис. 1 представлены спектры отражения полученных образцов (на всех образцах толщина слоя Ti составляет 50 нм). Поглощение излучения для образцов Si/Ti на длинах волн 405 нм (Образец #2) и 532 нм (Образец #3) по сравнению с плёнкой Ti было увеличено в ~1,3 и ~1,7 раза соответственно.

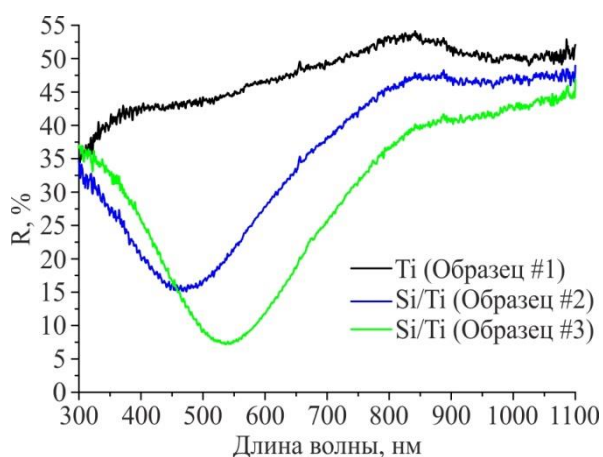
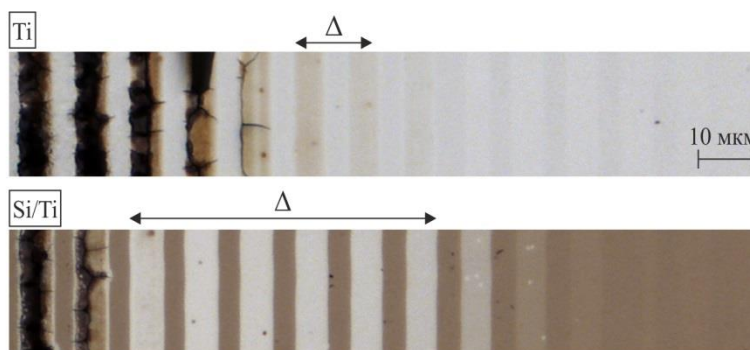
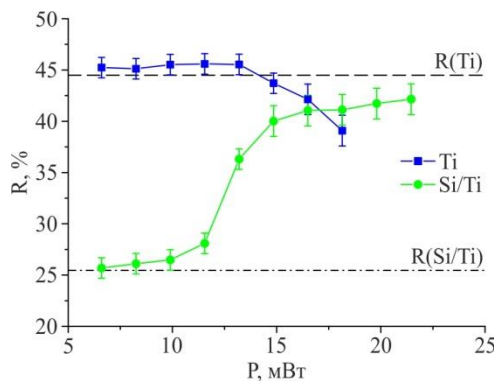


Рис. 1. Спектры отражения исследуемых образцов плёнок Ti и Si/Ti



а) Микроизображения на отражение тестовых структур, записанных с различной мощностью при прямой лазерной записи на плёнке Ti (сверху) и двухслойной плёнке Si/Ti (снизу)



б) Изменение отражения (на длине волны 532 нм) модифицированных участков плёнок Ti и Si/Ti

Рис. 2. Запись тестовых структур на плёнках Ti и Si/Ti (длина волны лазера 405 нм)

На рис. 2а представлены микроизображения в отражённом свете экспонированных участков плёнки Ti (Образец #1) и двухслойной пленки Si/Ti (Образец #2). Данные эксперименты проводились на установке XY-лазерной литографии (параметры записи: диаметр лазерного пучка ~700 нм (FWHM); скорость сканирования (V) 1,6 мм/с; режим записи – импульсный; длина импульсов ~2 нс; пространственный период импульсов 250 нм). Отдельные полосы на рис. 2а были сформированы путём записи группы треков. Каждая группа треков записывалась при определенном значении мощности лазерного пучка (P) с шагом сканирования между отдельными треками равным 250 нм. Такой шаг обеспечивал частичное наложение лазерного записывающего пучка на уже модифицированные участки облучённой плёнки. Группы треков записывались с периодом 10 мкм относительно друг друга. На рис. 2б показаны зависимости изменения отражения от экспонированных участков на исследуемых образцах. На рис. 2а видно, что диапазон мощности термохимической лазерной записи (Δ) для плёнки Si/Ti существенно увеличен по сравнению с записью на однослойной плёнке Ti.

Использование покровного слоя кремния, также позволяет увеличить скорость лазерной записи. Например, при толщине пленки Ti ~ 60 нм максимальная скорость сканирования при лазерной записи составляет ~ 200 мм/с [7]. При этом экспериментальные результаты лазерной записи на плёнке Si/Ti (Образец #3) на круговой лазерной записывающей системе показали возможность увеличения скорости сканирования как минимум до 600 мм/с [4]. И можно предположить, что данная скорость записи не является предельной. Было получено, что термохимическое лазерное воздействие на плёнку Si/Ti приводит к образованию в экспонированных участках силицида титана, оксида титана в форме рутила и возможно оксида кремния [4]. На интерферометре белого света (WLI) были получены оптически измеренной глубины профиля (ОИГП) тестовых структур, сформированных на пленках Si/Ti, в зависимости от мощности и скорости сканирования лазерного записывающего пучка (рис. 3). По полученным данным видно, что при лазерной записи на Образце #3 наблюдается увеличение оптически измеренной глубины профиля тестовых структур до ~150 нм, в то время как их физическая глубина, измеренная на атомно-силовом микроскопе, не превышала 25 нм. Данный эффект можно объяснить тем, что электрические и оптические свойства силицида титана близки к свойствам металлов. В связи с этим при отражении от него света возникает значительный фазовый сдвиг по отношению к участкам неэкспонированного слоя кремния. Также можно отметить, что с уменьшением скорости записи оптически измеренная фазовая глубина структур увеличивалась. При этом при лазерной записи на Образце #2, толщина покровного слоя Si на котором тоньше в ~2 раза по сравнению с Образцом #3, существенного увеличения параметра ОИГП не наблюдалось. Таким образом, полученные результаты показывают, что обнаруженный эффект зависит как от скорости записи, так и от толщины покровного слоя кремния.

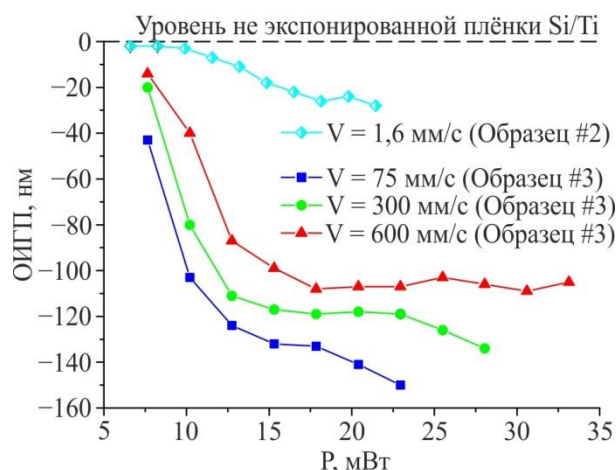


Рис. 3. Оптически измеренная глубина профиля тестовых структур (длина волны лазерного записывающего пучка 532 нм).

Заключение

Проведено исследование термохимической технологии прямой лазерной записи на плёнках Ti с покрывным слоем Si. Полученные результаты показывают, что использование антиотражающего слоя кремния позволяет увеличить скорость термохимической лазерной записи на пленке Ti не менее чем до 600 мм/с. При этом существенно увеличивается диапазон мощности термохимической лазерной записи по сравнению с записью на однослойной плёнке Ti. При одноэтапной технологии прямой лазерной записи на двухслойной плёнке Si/Ti обнаружен эффект аномального фазового сдвига между выступами и канавками записанных отражательных решёток, который зависит от скорости сканирования лазерного записывающего пучка и толщины покрывного слоя Si. Данный эффект может быть использован для одноэтапной технологии лазерной записи отражательных дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Для этого толщину покрывного слоя Si нужно оптимизировать не с целью увеличения поглощения на длине волны записывающего пучка, а из условия получения оптической глубины профиля, равной четверти рабочей длины волны ДОЭ.

При термохимической лазерной записи на двухслойных плёнках Si/Ti покрывный слой кремния также участвует в термохимической реакции и приводит к образованию в экспонированных участках силицида титана и, возможно, оксида кремния. Проявление химически стойкого силицида титана, путём травления неэкспонированного слоя Si, с последующим селективным травлением неэкспонированной титановой пленки может сделать возможным формирование силицидных или силицидно-титановых масок на подложке из плавленого кварца. Дальнейшее реактивное ионное травление подложки из плавленого кварца через сформированную силицидно-титановую маску (например, в смеси CF_4 и H_2 [8]) может быть использовано для изготовления ДОЭ с фазовой структурой микрорельефа. Соотношение скоростей травления $SiO_2:TiSi_2$ может достигать 40:1 [8]. Это выше селективности стандартной хромовой технологии, для которой соответствующее соотношение скоростей травления $SiO_2:Cr$ составляет ~30:1.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-79-00049 с использованием оборудования ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН и ЦКП «Высокие технологии и аналитика наносистем» НГУ.

Список источников

- [1] **Shakhno, E. A.** Features of laser oxidation of thin films of titanium / E. A. Shakhno, D. A. Sinev, A. M. Kulazhkin // *Journal of Optical Technology*. — 2014. — Vol 81. — № 5. — P. 298–302.
- [2] **Xia, F.** Mechanism of pulsed-laser-induced oxidation of titanium films / F. Xia, L. Jiao, D. Wu, S. Li, K. Zhang, W. Kong, M. Yun, Q. Liu, X. Zhang // *Optical Materials Express*. — 2019. — Vol 9. — № 10. — P. 4097–4103.
- [3] **Korolkov, V. P.** Usage of dry processes for the formation of diffractive structures on Ti and Ti/Si films / V. P. Korolkov, R. I. Kuts, A. I. Malyshev, D. A. Belousov, A. E. Matochkin // *SPIE Conference Proceeding*. — 2021. — Vol. 11873. — P. 1187307. — DOI: 10.1117/12.2597162.
- [4] **Belousov, D. A.** Direct Laser Writing of Diffractive Structures on Bi-Layer Si/Ti Films Coated on Fused Silica Substrates / D. A. Belousov, R. I. Kuts, K. A. Okotrub, V. P. Korolkov // *Photonics*. — 2023. — Vol. 10. — № 7. — P. 771.
- [5] **Корольков, В. П.** Оптимизация оптического канала X-Y лазерного нанолитографа для записи на фото- и термочувствительных материалах / В. П. Корольков, А. Г. Седухин, А. Е. Качкин, А. Е. Елисафенко // *Интерэкспо Гео-Сибирь. Национальная конференция с международным участием "СИБОПТИКА-2019"*. — 2019. — Том 8. — С. 28–33.
- [6] **Poleshchuk, A. G.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure / A. G. Poleshchuk, E. G. Churin, V. P. Koronkevich, V. P. Korolkov, A. A. Kharissov, V. V. Cherkashin, V. P. Kiryanov, A. V. Kiryanov, S. A. Kokarev, A. G. Verhoglyad // *Applied Optics*. — 1999. — Vol 38. — № 8. — P. 1295–1301.
- [7] **Korolkov, V. P.** Increasing the spatial resolution of direct laser writing of diffractive structures on thin films of titanium group metals / V. P. Korolkov, A. G. Sedukhin, D. A. Belousov, R. V. Shimansky, V. N. Khomutov, S. L. Mikerin, E. V. Spesivtsev, R. I. Kuts // *SPIE Conference Proceeding*. — 2019. — Vol. 11030. — P. 110300A. — DOI: 10.1117/12.2520978.
- [8] **Jaso, M. A.** Etch Selectivity of Silicon Dioxide over Titanium Silicide Using CF_4/H_2 Reactive Ion Etching / M. A. Jaso, S. W. Robey, G. S. Oehrlein // *Journal of the Electrochemical Society*. — 1989. — Vol 136. — № 12. — P. 3812.

Laser Writing of Silicide Structures on Ti Films with Capping Layer of Si

D. A. Belousov, R. I. Kuts, V. P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

The paper presents the results of development of thermochemical technology for forming masks on titanium films by stimulating the formation reaction of titanium silicide during the heating of a capping layer of silicon on titanium using a focused laser beam. The Si layer serves three functions: it protects the titanium film from slow oxidation in the air, enhances absorption of laser irradiation,

and participates in the formation of chemically stable silicide. The proposed technology enables an increase in speed and power range of laser writing of diffractive structures compared to writing on Ti films. The study discovered an effect that increases the phase changes between grooves and ridges of the written reflection gratings, depending on the beam scanning speed and the Si layer thickness.

Keywords: Thermochemical laser technology, Direct laser writing, Thin metal films, Capping layer, Absorption coefficient, Diffractive optics.

Методы записи радужных голограмм на стеклах

Д. А. Синева, К. Ибрагим, А. Р. Суворов, А. Д. Пивоваров, Е. В. Усынина, Р. М. Мухсинова, Е. А. Авилова, В. А. Домакова, А. Рамос Веласкес, Я. М. Андреева

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Показана возможность формирования элементов типа защитных радужных голограмм на стеклянных подложках за счет управляемого формирования термохимических лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур на предварительно нанесенных акцепторных пленках. Рассмотрены визуальные эффекты на рельефах, записанных на пленках титана нанесенных методом распыления в вакууме (характерные периоды рельефов после лазерной обработки составляют $0,74 \pm 0,03$ мкм), на предварительно осажденных (лазерно-перенесенных) пленках титана и стали (периоды $0,65 \pm 0,03$ мкм), на золь-гель плёнках диоксида титана с частицами серебра (периоды порядка $0,35$ мкм и меньше).

Ключевые слова: Тонкие пленки, Композитные пленки, Лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры, Радужные голограммы, Защитные знаки.

Цитирование: Синева, Д. А. Методы записи радужных голограмм на стеклах / Д. А. Синева, К. Ибрагим, А. Р. Суворов, А. Д. Пивоваров, Е. В. Усынина, Р. М. Мухсинова, Е. А. Авилова, В. А. Домакова, А. Рамос Веласкес, Я. М. Андреева // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 324–328.

Введение

Маркировка стёкол и других оптически прозрачных материалов широко востребована в разнообразных областях современного производства, например для нанесения маркировок на бытовые изделия, окна, стёкла транспортных средств, оптические элементы и ампулы медицинских препаратов. При этом обработка стеклообразных материалов механическими методами (шлифовкой и химическим матированием) является достаточно трудоёмким и времязатратным процессом ввиду их твердости и хрупкости, а нанесение маркировки на изделие методами штамповки ограничивает разрешающую способность и не позволяет достичь высокой устойчивости нанесенного символа. Помимо этого, возникает сложность нанесения элементов одновременно с высоким контрастом, разрешением и полихромностью, что принципиально важно в случае нанесения штрихкодов или защитных меток на изделия для их последующего считывания [1].

Методы и материалы

В настоящей работе описаны полученные результаты в области создания прототипов защитных радужных голограмм для маркировки стеклянных изделий. Предложенные подходы включают в себя предварительное нанесение на поверхность стеклянной подложки жертвенного слоя из материалов, склонных к образованию периодических рельефов под лазерным воздействием в результате интерференции падающего и рассеянного излучения (так называемые лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры, ЛИПЭС) [2]. Все результаты были получены под воздействием импульсов наносекундной

длительности излучения Yb-волоконного лазера на тонкопленочные материалы на стеклянных подложках. В качестве материалов были использованы три типа подложек:

- пленки титана толщиной 30 нм, нанесенные на подложку из кварцевого стекла путем распыления в вакууме [2],
- пленки титана и стали толщиной порядка 1 мкм, нанесенные на подложку из приборного стекла путем лазерно-индуцированного переноса на воздухе [1],
- пленки диоксида титана, допированные наночастицами серебра, толщиной 170-180 нм, нанесенные на подложку из приборного стекла золь-гель методом [3].

Результаты и обсуждение

В результате окисления пленок титана под воздействием излучения с длиной волны 1,07 мкм, мощностью порядка 100 мВт и скоростью сканирования порядка 0,1 мм/с на их поверхности образуются упорядоченные рельефы (термохимические ЛИППС), характерный период которых составляет 740 ± 30 нм. Получаемые рельефы могут быть комбинированы при двумерной развертке, а также при повторном экспонировании, для создания одномерных и двумерных рельефов типа поверхностных дифракционных решеток разнообразных конфигураций (рис. 1). Разнообразие получаемых структур обеспечивается поворотом вектора линейной поляризации лазерного излучения при экспонировании, что открывает потенциал широкой вариативности создания элементов защитных радужных голограмм, отличающихся геометрическими характеристиками (ориентация, симметрия, период, упорядоченность, топология и пр.).

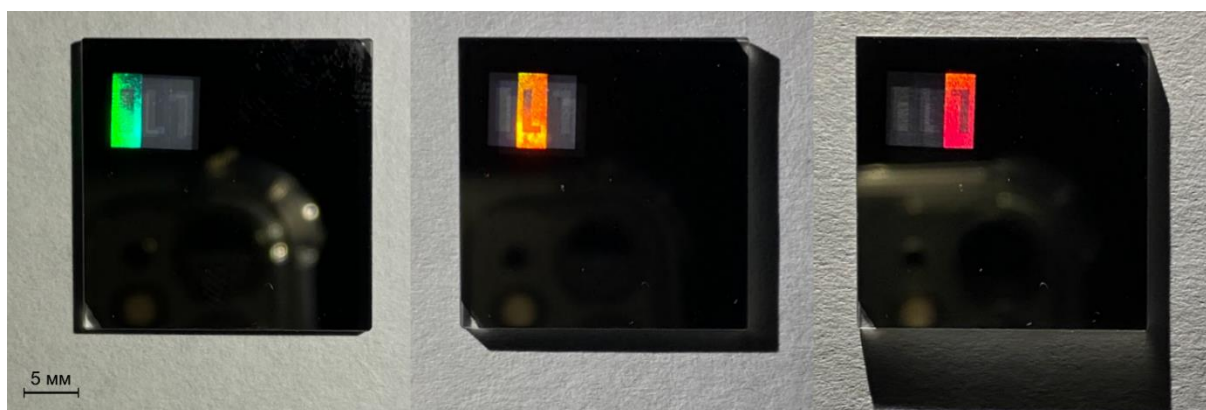


Рис. 1. Пример радужной голограммы, записанной на тонкой пленке титана на кварцевом стекле при различном угле ориентации ЛИППС в сегментах. Цвет и порядок подсвечивания зависят от угла освещения

Запись ЛИППС на тонких металлических пленках открывает перспективу маркировки стеклянных изделий быстрым и доступным способом при помощи лазерного излучения. При этом, однако, необходимым является напыление металлического покрытия, осуществляемое обычно путем распыления мишени в вакууме. Заменить этот этап возможно за счет применения метода лазерно-индуцированного обратного переноса, при этом перенос осуществляется локально, что также устраняет необходимость удаления остаточного

металлического слоя в необработанных областях. В результате повторного экспонирования лазерно-перенесенных покрытий титана и стали излучением с длиной волны 1,07 мкм, мощностью порядка 500 мВт и скоростью сканирования порядка 1 мм/с, также образуются субмикронные рельефы, обладающие свойствами дифракционных решеток (рис.2).

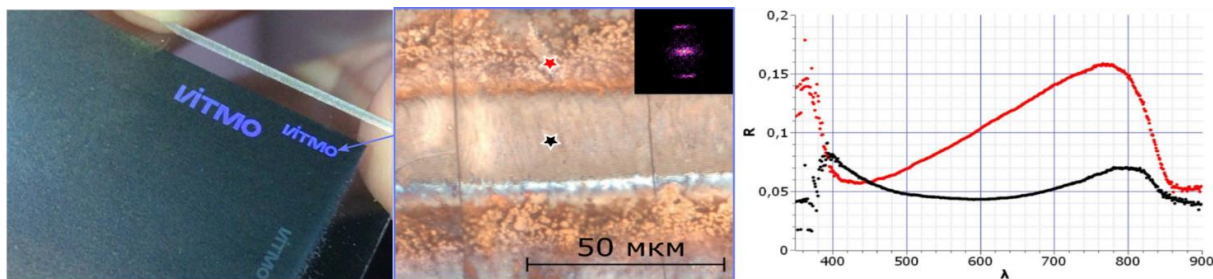


Рис. 2. (а) Характерный вид и (б) микрофотография структуры на предварительно осажденной пленке титана после повторного экспонирования в режиме, способствующем формированию ЛИППС.

На врезке приведен 2Д-БПФ спектр центральной области изображения. (б) Спектр отражения нормально поверхности образца: для исходной поверхности пленки (красный) и после нанесения ЛИППС, сонаправленного сканированию (черный).

Производительность записи может быть повышена с применением излучения УФ диапазона. К примеру, формирование полихромных меток типа защитных радужных голограмм было продемонстрировано при облучении тонких пористых пленок диоксида титана, пропитанных ионами, молекулярными кластерами и наночастицами серебра (диаметром до 10 нм), излучением с длиной волны 355 нм (третья гармоника иттербиевого волоконного лазера). Облучение производилось при скоростях сканирования 50–500 мм/с, комбинация различных режимов лазерного воздействия позволяла фиксировать различные цветные изображения со скрытыми защитными признаками на нанокompозитной пленке (рис.3).

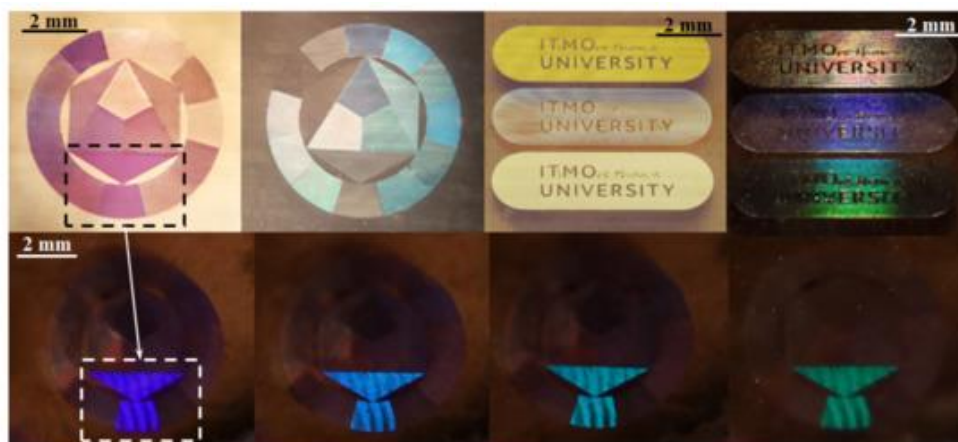


Рис. 3. Примеры записи радужных голограмм на нанокompозитных решетках: каждый сектор получен с разными параметрами лазерной обработки (фотографии пропускания и отражения для разных углов освещения); логотип Университета ИТМО — фотографии в режимах отражения и рассеяния [3]

Например, при наблюдении в проходящем и отраженном свете каждый сектор элемента имеет собственный цвет, а при освещении структуры под небольшим зенитным углом проявляет дисперсионные свойства.

Заключение

Предлагаемые подходы к маркировке стёкол за счет обработки предварительно нанесенных покрытий позволяют не только нанести однотонную контрастную метку, но и получить различные цветовые оттенки, что может служить как дополнительной степенью защиты от фальсификации, так и элементом дизайна изделия. Полная управляемость параметров формируемых элементов достигается благодаря возможности использовать металлические мишени различного состава, а также за счёт варьирования режимов лазерного воздействия, приводящего к локальному формированию структурированных покрытий с заданными свойствами.

Благодарности

Работы выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №21-79-10241. Авторы благодарят: ЦКП ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН за помощь с проведением ПЭМ-анализа структур, МРЦ-НТ СПб ГУ за помощь с проведением СЭМ-анализа структур и напыление пленок титана, Dr. Francis Vocanson (Laboratoire Hubert Curien, St.Etienne, France) за подготовку пленок диоксида титана, ООО Лазерный центр за предоставленное оборудование.

Список источников

- [1] **Ramos-Velazquez, A.** Laser-induced micro-scale polychrome marking of glass materials / A. Ramos-Velazquez, J. Amiaga, D. Pankin, G. Odintsova, R. Zakoldaev, V. Veiko // *Materials Letters*. — 2023. — Vol. 343. — pp. 134372. — DOI: 10.1016/j.matlet.2023.134372
- [2] **Sinev, D. A.** Formation of the Submicron Oxidative LIPSS on Thin Titanium Films During Nanosecond Laser Recording / D. A. Sinev, D. S. Yuzhakova, M. K. Moskvina, V. P. Veiko // *Nanomaterials*. — 2020. — Vol. 10. — No. 11. — pp. 2161. — DOI: 10.3390/nano10112161
- [3] **Andreeva, Y.** Laser Fabrication of Highly Ordered Nanocomposite Subwavelength Gratings / Y. Andreeva, A. Suvorov, E. Grigoryev, D. Khmelenin, M. Zhukov, V. Makin, D. Sinev // *Nanomaterials*. — 2022. — Vol. 12. — No. 16.— P. 2811.

Methods of rainbow holograms recording on glass

*D. Sinev, Q. Ibrahim, A. Suvorov, A. Pivovarov, E. Usynina, R. Mukhsinova, E. Avilova,
V. Domakova, A. Ramos-Velazquez, Y. Andreeva*

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Fuctuional elements such as protective rainbow holograms on glass substrates are developed based on the controlled formation of thermochemical laser-induced surface periodic structures on the pre-deposited acceptor films. Visual effects are shown on gratings recorded on titanium films deposited by vacuum sputtering (the characteristic periods of reliefs after laser processing are $0.74 \pm 0.03 \mu\text{m}$), on pre-deposited (laser-transferred) titanium and steel films (periods $0.65 \pm 0.03 \mu\text{m}$), on sol-gel films of titanium dioxide with silver particles (periods of the order of 350 nm and less).

Keywords: Thin films, Composite films, Laser-induced periodic surface structures, Rainbow holograms, Protective signs.

О механизме лазерной сверхдифракционной обработки тонкой плёнки молибдена

С. Д. Полетаев

Институт систем обработки изображений Российской академии наук – филиал Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, Самара, Россия

Путём численного моделирования исследовано влияние теплофизических свойств плёнки молибдена в процессе лазерной абляции на ширину формирующегося трека. В соответствии с полученными данными произведено уточнение гипотезы, объясняющей сокращение ширины трека в зоне абляции плёнки по сравнению с эффективным диаметром лазерного пучка. Показано, что специфическое изменение коэффициента теплопроводности вещества в момент окисления оказывает значительное влияние на распределение температурного поля, выражаемое в сужении характеристики распределения температуры по поверхности плёнки, что ранее не рассматривалось. Установлено, что изменение плотности, удельной теплоёмкости и тепловой эффект химической реакции окисления молибдена в процессе окисления плёнки не оказывают существенного влияния на распределение температуры в зоне воздействия лазерного пучка.

Ключевые слова: Оптика, COMSOL, Оптический элемент, Лазерная абляция, Фототермический эффект.

Цитирование: Полетаев, С. Д. О механизме лазерной сверхдифракционной обработки тонкой плёнки молибдена / С. Д. Полетаев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 329–340.

Введение

В настоящее время прямая лазерная запись широко применяется для создания различных изделий микро- и нанотехнологий, таких как фотошаблоны для литографии [1], интегральные схемы [2], микрооптические устройства [3]. Одним из направлений в этой области исследований является формирование микрорельефа в тонких металлических плёнках путём абляции (удаления) вещества под действием сфокусированного лазерного излучения. Полученные микроструктуры могут быть использованы как самостоятельные оптические элементы, так и в качестве масок для последующего селективного травления целевого материала. Однако для создания дифракционных оптических элементов видимого диапазона длин волн необходимы микроструктуры с частотой штрихов более 500 мм^{-1} . Разрешение же прямой лазерной записи недостаточно велико для изготовления таких микроструктур вследствие дифракционного предела.

Преодолеть существующие ограничения возможно за счет поиска условий нелинейного взаимодействия лазера и материала, позволяющего избирательно использовать максимум гауссового распределения интенсивности излучения в фокальном пятне [4]. Ранее было экспериментально показано, что в этом отношении могут быть перспективны тонкие плёнки

молибдена. В работе [5] была исследована лазерная абляция молибденовых плёнок толщиной менее 50 нм при интенсивности излучения 1 - 10 МВт/см². Особенность результата заключалась в трехкратном уменьшении зоны абляции по сравнению с исходным диаметром фокального пятна (0,8 мкм). Было предположено, что этот эффект связан с промежуточным окислением металла [6]. Согласно ранее полученным результатам моделирования образование оксида в центральной зоне воздействия лазерного пучка приводит к значительному повышению температуры в области воздействия фокального пятна. Модель учитывала изменение теплофизические параметров, соответствующее переходу от молибдена к его оксиду, однако подробно их влияние на распределение температуры в зоне воздействия лазерного пучка не рассматривалось. Было предположено, что изменение теплофизических свойств плёнки в процессе окисления может способствовать появлению нелинейного температурного эффекта, приводящего к существенному сокращению ширины трека в плёнке.

Для развития экспериментальных исследований в данной области необходим дальнейший поиск возможных тепловых эффектов и закономерностей методом моделирования. В настоящей работе численно исследовано влияние изменений теплофизических характеристик тонкой плёнки молибдена в процессе окисления на распределение температуры при локальном воздействии лазерного излучения с плотностью мощности порядка ~10 МВт/см².

1. Метод и постановка задачи

На рис. 1 показана моделируемая система, представляющая собой фрагмент подложки плавленого кварца, покрытой плёнкой металла. Граница б соответствует участку, подвергаемому воздействию круглого пятна лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности относительно начала координат с характеристиками, соответствующими станции лазерной записи CLWS-200 [6]. Под действием лазерного излучения плёнка испаряется, формируя трек, ширина которого определяется длительностью воздействия и интенсивностью излучения в фокальном пятне. Подложка и плёнка имеют размеры 4000 × 600 нм и 4000 × 35 нм соответственно. В рамках работы будет исследовано предполагаемое влияние изменения теплофизических характеристик плёнки в процессе промежуточного окисления молибдена на возникновение эффекта сокращения ширины трека по сравнению с эффективным диаметром пятна лазерного излучения.

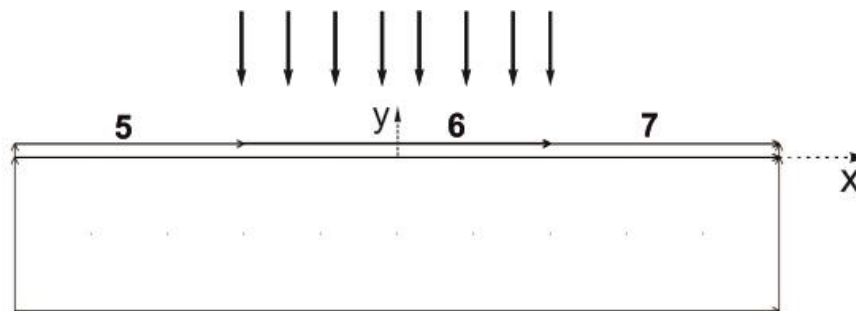


Рис. 1. Моделируемая система

Численный эксперимент, реализующий решение задачи, проводился в программной среде COMSOL Multiphysics v.5.2 (COMSOL) с физическим модулем Heat Transfer With Surface to Surface Radiation. Данный модуль используется для моделирования теплопередачи за счет проводимости, конвекции и излучения, включая излучение от поверхности к поверхности.

Химическая реакция окисления молибдена приводит к скачкообразному изменению теплофизических параметров и соответствующему появлению межфазной границы металл - оксид. Поэтому моделирование проводилось методом сквозного счёта со сглаживанием коэффициентов, которыми в задачах теплопроводности являются теплофизические характеристики: плотность, удельная теплоёмкость, коэффициент теплопроводности. Метод сквозного счёта не выделяет границу фаз и применяет уравнение теплопроводности для всей расчётной области. При этом исходная задача представляется программой в виде единого уравнения с разрывными коэффициентами (теплофизическими параметрами) на межфазной границе. Для реализации численного метода решения задачи проводится процедура сглаживания разрывных коэффициентов в области межфазного перехода. При этом ступенчатая область межфазного перехода заменяется линейной функцией, крутизна которой определяется заданным интервалом ΔT . Чем меньше заданная величина интервала ΔT , тем точнее определяется положение границы. Однако слишком малое значение ΔT может вызвать проблему сходимости решения задачи.

Алгоритм расчёта основан на решении дифференциальных уравнений теплопроводности в частных производных методом конечных элементов. Порядок постановки и решения задачи в данной программной среде уже рассматривался.

Основные допущения модели:

1. Динамика развития химической реакции окисления молибдена с ростом температуры не учитывалась, поскольку ключевое значение при этом имеет лишь факт изменения теплофизических свойств материала.

2. Зависимость тепловых характеристики материалов не учитывалось, поскольку в интервале температур 300 - 900 К их изменения несущественны (в пределах 10%).

Гипотеза, объясняющая эффект сокращения ширины трека по сравнению с эффективным диаметром лазерного пучка, отводит ключевую роль промежуточному процессу окисления молибдена. Поэтому задача учитывает фазовый переход металл - оксид при температуре

окисления 870 К. В таблице 1 приведены заложенные в модель константы. В COMSOL версии 5.x граничные условия, свойства доменов и границ задаются через дополнительные субмодули или интерфейсы. Доменами в COMSOL являются физические элементы геометрии (в данном случае плёнка и подложка). Теплофизические свойства кварцевой подложки (плотность, удельная теплоёмкость, коэффициент теплопроводности) [14] задавались в модуле Materials и вызывались в интерфейсе Heat Transfer in Solids.

Таблица 1. Константы

Параметр	Значение
Радиус фокального пятна r_0 , мкм	0,8
Начальный коэффициент поглощения (A_0)	0,4
Плотность мощности в центре пучка (Q_0), Вт/м ²	$2,0 \cdot 10^9$
Температура фазового перехода (окисления), К	870
Интервал аппроксимации фазового перехода, К	10
Начальный термооптический коэффициент α , К ⁻¹	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Теплота образования оксида молибдена MoO_3 (H), кДж/кг	5000

Задание всех необходимых разрывных коэффициентов для расчёта в области плёнки проводилось четырьмя ступенчатыми функциями в разделе Parametrs. Три из них обеспечивали изменение теплофизических параметров (плотность, теплоёмкость, коэффициент теплопроводности) в момент окисления при температуре 870 К. Четвёртая функция предназначалась для симуляции теплового эффекта химической реакции окисления молибдена, который также является разрывным коэффициентом, изменяющимся в момент окисления плёнки. Здесь зависимой величиной от температуры является объёмное тепловыделение, выражаемое формулой:

$$Q = H \cdot \rho,$$

где H - теплота образования оксида молибдена MoO_3 из простых веществ, кДж/кг, ρ - плотность оксида молибдена, кг/м³.

Объёмное тепловыделение после начала окисления задавалось постоянным во времени, что упрощает настройки, и при этом позволяет рассмотреть крайний случай, когда взаимодействие лазерного излучения с плёнкой сопровождается дополнительным непрерывным точечным источником тепла.

С целью сглаживания разрывных коэффициентов задавался интервал линеаризации функции ΔT . Предварительный эксперимент показал, что значение $\Delta T = 10$ К обеспечивает сходимость решения задачи. Функция теплового эффекта вызывалась в дополнительном интерфейсе Heat Source теплового модуля. Данный интерфейс предназначен для активации дополнительного источника тепла различной природы внутри моделируемой геометрии. Отметим, что выражение физических величин через ступенчатую функцию позволяет

определить область действия необходимого интерфейса. В данном случае функция теплового эффекта задаёт работу интерфейса Heat Source, лишь начиная с температуры окисления.

Для участков плёнки, находящихся в контакте с окружающей средой (границы 5, 7), учитывался общий тепловой поток. При необходимости может быть учтён только один вид теплопередачи. Граница 6 создавалась для задания лазерного воздействия в виде гауссового закона распределения интенсивности излучения на поверхности плёнки:

$$Q(r)=A \cdot Q_0 \cdot \exp(-x^2/2r^2),$$

где Q_0 - интенсивность лазерного излучения в центре фокального пятна, r - радиус фокального пятна (по уровню 0.1), x - текущая координата в пределах r .

Температурная зависимость коэффициента поглощения пленки:

$$A = A_0 + \alpha T,$$

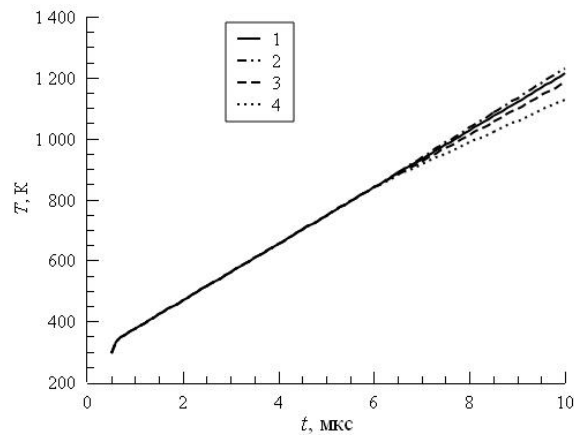
где A_0 - коэффициент поглощения плёнки при $T = 300$ К ($A_0 = 0,4$), α - термооптический коэффициент пленки, T - текущая температура.

Константы r , Q_0 и выражение 2 задавались в интерфейсе Variables модуля Definitions. Отметим, что в COMSOL версии 5.x все выражения также могут задаваться в интерфейсе Variables, а затем вызываться в соответствующем физическом модуле.

Расчёт проводился времязависимым решателем Time dependent для времени t в диапазоне 0,2 - 10 мкс с шагом 0,1 мкс. Выбранный временной диапазон позволяет наблюдать возникающие тепловые эффекты по мере нагревания плёнки.

2. Результаты и обсуждение

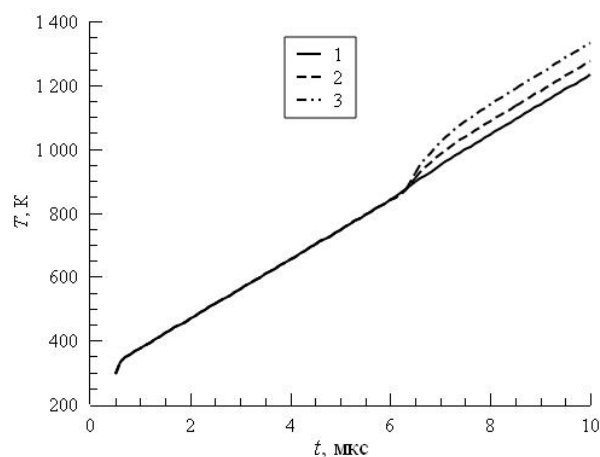
На рис. 2 представлена зависимость температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при неизменных теплофизических параметрах, а также при пятикратном изменении удельной теплоёмкости и плотности вещества в момент окисления. При неизменных теплофизических параметрах температура растёт линейно на полном временном отрезке (график 1). Уменьшение плотности вещества в 5 раз (график 2) приводит к незначительному изменению угла наклона графика в момент окисления. Расчёты показали, что даже десятикратное изменение плотности не приводит к дальнейшему заметному увеличению угла наклона графика. Увеличение теплоёмкости (c) приводит к небольшому снижению динамики роста температуры. Так при двукратном увеличении с максимальное значение температуры снижается на 30 К в момент $t = 10$ мкс по сравнению с линейным графиком. Пятикратное увеличение c приводит к снижению температуры до почти 100 К (график 4). Пятикратное уменьшение теплоёмкости после окисления не приводит к существенному отличию от графика 2. Отметим, что интерес представляют такие значения теплофизических параметров, которые ускоряют динамику роста температуры, что может способствовать выявлению тепловых эффектов, отвечающих поставленной задаче. В данном случае увеличение теплоёмкости в процессе окисления замедляет динамику, а кратное снижение приводит лишь к незначительному росту температуры. Аналогичный эффект оказывает изменение плотности вещества.



1 - $(\rho, c, k, \alpha) = \text{const}$, 2 - пятикратное уменьшение ρ ,
 3 - двукратное увеличение c , 4 - пятикратное увеличение c

Рис. 2. Зависимость температуры плёнки от времен воздействия лазерного излучения; $x = 0$,
 $y = 45 \text{ нм}$

На рис. 3 показана зависимость температуры от времени воздействия лазерного излучения при различных значениях коэффициента теплопроводности (k). Уменьшение коэффициента приблизительно в 2 раза приводит к заметному нарастанию температуры в момент окисления. После окисления график не изменяет угла наклона к оси времени. При изменении k , соответствующего оксиду молибдена (график 3), в момент окисления температура возрастает с 870 до 1000 К менее чем за 1 мкс и после завершения окисления температура продолжает расти линейно. Двукратное уменьшение k (график 2) вызывает менее существенный эффект роста температуры.



1 - $k_1 = 65$, 2 - $k_2 = 25$, $k_3 = 10 \text{ Вт/(м·К)}$

Рис. 3. Зависимость температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при
 различном коэффициенте теплопроводности; $x = 0$, $y = 45 \text{ нм}$

На рис. 4 представлена зависимость температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при различном термооптическом коэффициенте, устанавливающим связь между показателем преломления вещества и температурой. Из рисунка видно, что

изменение термооптического коэффициента с $3,0 \cdot 10^{-5}$ до $8,0 \cdot 10^{-5}$ (графики 1, 2), приводит к приросту температуры на 80 К в момент времени 10 мкс. Дальнейший рост термооптического коэффициента до $3,0 \cdot 10^{-4}$ приводит к стремительному увеличению угла наклона графика после окисления. Максимальная температура достигает 1570 К. Ускорение роста температуры в момент окисления вызвано скачкообразным ростом коэффициента поглощения плёнки.

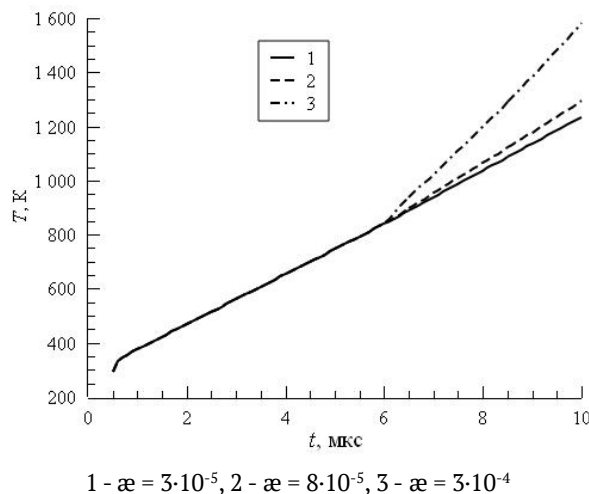
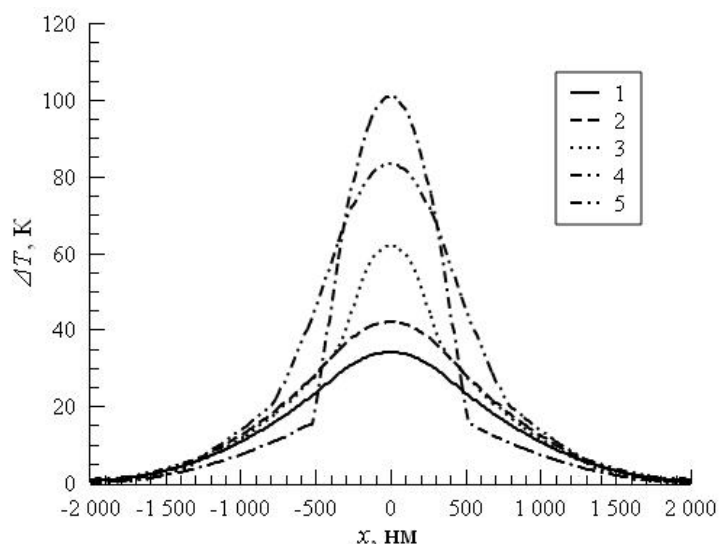


Рис. 4. Зависимость температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при различном термооптическом коэффициенте; $x = 0$, $y = 45$ нм

На рис. 5 приведены графики распределения температуры вдоль поверхности металлической плёнки (границы 5-7, рисунок 1) в зависимости от коэффициента теплопроводности (графики 1-4) и термооптического коэффициента (график 5) без учёта теплового эффекта окисления молибдена. График 1 соответствует плёнке молибдена до начала окисления. В момент окисления форма графиков изменяется. По мере увеличения коэффициента теплопроводности график всё более сужается и становится остроконечным, а температура в центральной части возрастает. При $k = 25$, соответствующего оксиду молибдена, ΔT возрастает до 65 К по сравнению с 25 К до начала окисления. При гипотетическом значении $k = 10$ ΔT достигает 105 К. При этом, по мере увеличения коэффициента теплопроводности на участке $x \in (0; r)$ скорость снижения температуры также увеличивается. При $k = 65$ (график 2) температура хотя и увеличивается, однако форма кривой не изменяется. Это означает, что двукратное снижение коэффициента теплопроводности не должно оказывать заметного влияния на ширину зоны абляции. Отметим, что изменение плотности и удельной теплоёмкости, соответствующее оксиду молибдена, согласно полученным данным (рисунок 4) оказывает незначительное влияние на динамику температуры после окисления, которым можно пренебречь. Наблюдаемое поведение температуры при изменении коэффициента теплопроводности означает существенное уменьшение зоны интенсивного нагрева по сравнению с эффективным диаметром пучка и характеризуется усилением вертикальной составляющей теплового потока в области $x \ll r$ [6]. Весьма интересен результат, полученный для изменения термооптического

коэффициента. Его рост на порядок также приводит к росту температуры в центре, однако изменение формы графика проявлено слабо. Наблюдаемая область с повышенной температурой существенно шире, чем при изменении коэффициента теплопроводности, и лежит в пределах $\Delta x = 800$ нм. Пятикратное изменение (в сторону увеличения и уменьшения) удельной теплоёмкости в момент окисления не приводит к изменению распределения температуры по сравнению с графиком 1. Отсутствует эффект и от кратного изменения плотности вещества в момент окисления.

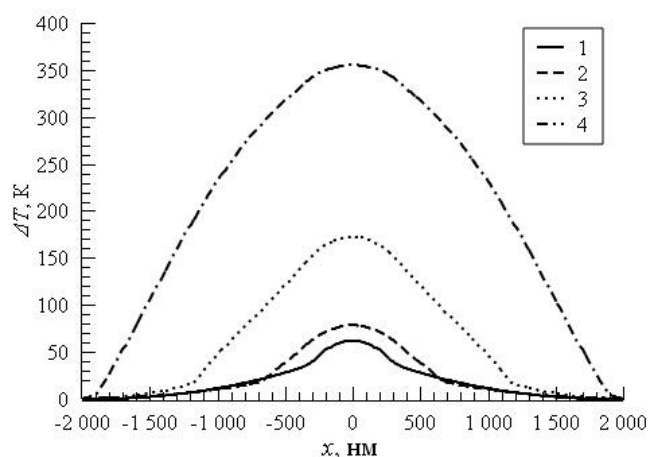


1 - до момента окисления и в момент окисления:

2 - $k = 65$, 3 - $k = 25$, 4 - $k = 10$, 5 - $k = 25$ Вт/(м·К), $\alpha = 3 \cdot 10^{-4}$ T⁻¹

Рис. 5. Распределение температуры на поверхности плёнки

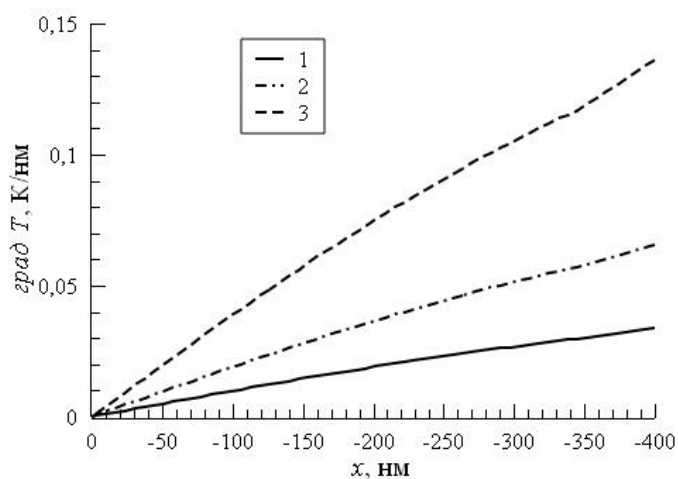
На рис. 6 представлены распределения температуры с учётом теплового эффекта химической реакции окисления молибдена. Видно, что при удельной теплоте образования (Н), соответствующей химической реакции оксида молибдена MoO_3 (график 1), распределение температуры практически не отличается от распределения, полученного без учёта теплового эффекта (график 3 рисунка 5). Эксперименты показали, что влияние теплового эффекта реакции окисления на распределение температуры становится заметным лишь при гипотетических значениях Н порядка $\sim 10^8$ кДж/кг. Дальнейшее увеличение Н приводит к расширению теплового пятна и значительному росту температуры в центре (графики 2-4). Так при $N = 5 \cdot 10^{10}$ кДж/кг прирост температуры достигает 360 К. Логично, что появление дополнительного источника тепла в зоне воздействия лазерного излучения должно сглаживать нелинейный тепловой эффект, наблюдаемый на рис. 5. Однако малые размеры области окисления приводят к небольшим значениям выделяемого тепла по абсолютной величине. Площадь термического контакта в боковом направлении в процессе выделения тепла ограничена толщиной плёнки, и также незначительна. Эти два обстоятельства могут объяснить отсутствие влияния теплового эффекта реакции на распределение температуры при $N = 5000$ кДж/кг.



1 - $H = 5000$, 2 - $H = 5 \cdot 10^8$, 3 - $H = 5 \cdot 10^9$, 4 - $H = 5 \cdot 10^{10}$ кДж/кг

Рис. 6. Распределение температуры на поверхности плёнки в зависимости от теплового эффекта реакции окисления

Полученные здесь и ранее результаты объясняют механизм образования трека в молибденовой плёнке в рамках известной тепловой модели [7]. Однако помимо испарения вещества предлагаемая гипотеза значительную роль отводит промежуточному процессу окисления молибдена. Нагрев плёнки молибдена сфокусированным лазерным излучением приводит к окислению металла с начальным образованием оксидного участка в центральной области, где интенсивность излучения наибольшая. Сокращению зоны окисления дополнительно может способствовать явление самофокусировки лазерного пучка в слое оксида, обладающем повышенным показателем преломления. Считалось, что сокращение зоны абляции объясняется, в основном, незначительной разницей температур между точками испарения оксида и окисления молибдена ($\Delta T < 400\text{K}$) [6]. Промежуточному окислению отводилась роль уменьшения этой разницы, поскольку температура кипения оксида молибдена намного меньше, чем металла. Однако результаты моделирования показывают, что в момент окисления происходит перераспределение температуры вдоль фокального пятна (рисунок 5) по причине изменения коэффициента теплопроводности. Температура в центральной части возрастает. По мере удаления от центра фокального пятна температура стремительно убывает и процесс окисления ограничивается. Это может быть вызвано тем, что уменьшение коэффициента теплопроводности в центральной окисленной зоне препятствует боковому распространению тепла, что косвенно подтверждается усилением вертикальной составляющей теплового потока [6]. Уменьшение зоны интенсивного нагрева также должно характеризоваться ростом горизонтальной составляющей градиента температуры в момент окисления, что показывает рис. 7.



1 - $k = 138$, 2 - $k = 65$, 3 - $k = 25$ Вт/(м·К)

Рис. 7. Градиент температуры на поверхности плёнки вдоль радиуса фокального пятна:

В момент уменьшения коэффициента теплопроводности со 138 до 25 Вт/(м·К) градиент температуры в любой точке фокального пятна возрастает в 4 раза (графики 1, 3). В результате, на расстоянии $\Delta x > 100$ нм от центра фокального пятна тепловое воздействие определяется лишь нисходящим участком гауссового распределения интенсивности излучения в пятне, что ограничивает рост температуры. Таким образом, изменение коэффициента теплопроводности в момент окисления молибдена приводит к уменьшению зоны интенсивного нагрева, в результате чего абляция плёнки наблюдается только в узкой центральной зоне.

Заключение

В работе представлены результаты моделирования процесса локального воздействия лазерного излучения на пленку молибдена, нанесенную на кварцевую подложку.

Численные эксперименты показали, что при достижении температуры окисления, соответствующей пятикратному уменьшению коэффициента теплопроводности плёнки, наблюдается резкое уменьшение ширины теплового пятна и значительный рост температуры в центральной зоне воздействия излучения, что означает сокращение зоны интенсивного нагрева по сравнению с эффективным диаметром пучка. Характерное уменьшение ширины теплового пятна усиливается по мере дальнейшего уменьшения коэффициента теплопроводности, что ещё более интенсифицирует процесс образования трека в центральной области воздействия лазерного пучка. Многократное изменение удельной теплоёмкости и плотности вещества не оказывает заметного влияния на динамику роста и распределения температуры после окисления.

Значения термооптического коэффициента порядка $\sim 10^{-5}$ при окислении не приводят к существенным температурным изменениям. Тем не менее, благодаря этому в момент окисления теоретически возможно дополнительное уменьшение эффективного радиуса фокального пятна, что усиливает наблюдаемый эффект. Однако даже при величине порядка $\sim 10^{-4}$ после окисления существенного уменьшения ширины теплового пятна не наблюдается.

Дальнейшее исследование влияния термооптического коэффициента затруднительно, поскольку требует дополнительного учёта динамических и нестабильных оптических эффектов, происходящих в тонкой плёнке.

Тепловой эффект химической реакции окисления молибдена не оказывает влияния на распределение температуры, что, по всей видимости, вызвано незначительным выделением тепла по абсолютной величине и малой площадью термического контакта области окисления с молибденом вдоль поверхности плёнки.

Поиск других металлов, обладающих схожим эффектом абляции под действием лазерного излучения, является важным элементом развития лазерных методов формирования микрорельефа и контактных масок. При этом целесообразно ориентироваться на соотношение коэффициента теплопроводности в паре металл - оксид, поскольку, согласно полученным данным, именно этот параметр ответственен за изменение формы распределения температуры в момент окисления, что приводит к сокращению ширины трека при воздействии лазерного пучка.

Благодарность

Работа выполнена в рамках госзадания «Кристаллография и фотоника» РАН/ (соглашение № 007-ГЗ/43363/26).

Список источников

- [1] **Полещук, А. Г.** Лазерные технологии в микрооптике. ч. 2. Изготовление элементов с трёхмерным микрорельефом / А. Г. Полещук, В. П. Корольков, В. П. Вейко, Р. А. Заколдаев, М. М. Сергеев // Автометрия. — 2018. — Том 54. — № 2. — С. 3–19.
- [2] **Qin, L.** 5 nm Nanogap Electrodes and Arrays by Super-resolution Laser Lithography / L. Qin, Y. Huang, F. Xia, L. Wang, J. Ning, H. Chen, X. Wang, W. Zhang, Y. Peng, Q. Liu // Nano Letters. — 2020. — Vol 20. — № 7. — P. 4916–4923.
- [3] **Wang, L.** Internal nanocavity based high-resolution and stable structural colours fabricated by laser printing / L. Wang, L. Ma, F. Xia, Q. Zhao, S. Wang, X. Wang, C. Zhang, W. Zhang, X. Wang, Q. Liu // Nano Letters. — 2021. — Vol 29. — № 5. — P. 7428–4934.
- [4] **Zhang, J.** Micro-optical elements fabricated by metal-transparent-metallic-oxides grayscale photomasks / J. Zhang, J. Guo, Y. Wang, J. Miao, Y. Tian, Q. Liu // Applied Optics. — 2012. — Vol 51. — № 27. — P. 6606–6611.
- [5] **Волков, А. В.** Высокорастворяющая лазерная запись контактных масок на плёнках молибдена для изготовления элементов дифракционной оптики / А. В. Волков, О. Ю. Моисеев, С. Д. Полетаев // Компьютерная оптика. — 2013. — Том 37. — № 2. — С. 220–225.
- [6] **Казанский, Н. Л.** Численное моделирование процесса абляции тонких пленок молибдена под действием лазерного излучения / Н. Л. Казанский, С. Д. Полетаев // Журнал технической физики. — 2016. — Том 86. — № 9. — С. 1–6.
- [7] **Анисимов, С. И.** Действие излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко — М.: Наука, 1970. — 272 с.

On the mechanism of laser superdiffraction processing of a thin molybdenum film

S. D. Poletayev

IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia

The influence of the thermophysical properties of the molybdenum film during laser ablation on the width of the forming track is investigated by numerical simulation. In accordance with the data obtained, the hypothesis explaining the reduction of the track width in the ablation zone of the film in comparison with the effective diameter of the laser beam was refined. It is shown that a specific change in the thermal conductivity coefficient of a substance at the time of oxidation has a significant effect on the distribution of the temperature field, expressed in a narrowing of the characteristic of the temperature distribution over the surface of the film, which was not previously considered. It is established that changes in the density, specific heat capacity and thermal effect of the chemical reaction of molybdenum oxidation during the oxidation of the film do not significantly affect the temperature distribution in the zone of exposure to the laser beam.

Keywords: Optics, COMSOL, Optical element, Laser ablation, Photothermal effect.

Круговые и маятниковые делительные машины – универсальное средство изготовления с нанометрической точностью штриховых структур различного назначения для современного оптико-электронного приборостроения и оптической технологии

А. Н. Мельников

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе рассматриваются актуальные задачи оптико-электронного приборостроения и оптической технологии, которые решаются оптимальным образом на основе использования штриховых структур, синтезируемых при помощи круговых и маятниковых делительных машин.

Ключевые слова: Круговая делительная машина, Маятниковая делительная машина, Штриховая структура, Технология изготовления, Нанометрическая точность, Область применения.

Цитирование: Мельников, А. Н. Круговые и маятниковые делительные машины – универсальное средство изготовления с нанометрической точностью штриховых структур различного назначения для современного оптико-электронного приборостроения и оптической технологии / А. Н. Мельников // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 341–346.

В АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики» (АО «НПО ГИПО») разработан и применяется ряд круговых делительных машин моделей МДА и МДГ-500, предназначенных для изготовления осевых штриховых структур – осевых синтезированных голограммных оптических элементов (ОСГОЭ), выполняющих функции оптических компенсаторов, оптических образцов, «силовых» оптических элементов, в частности, объективов, имитаторов аберраций, оптических элементов для систем концентрации излучения и других элементов [1–4].

Также в АО «НПО ГИПО» в рамках технологии изготовления нарезных штриховых структур выполняются исследования и разработки по направлению создания маятниковых делительных машин [5–15].

В таблице представлен ряд актуальных задач оптико-электронного приборостроения и оптической технологии, которые решаются оптимальным образом на основе использования штриховых структур, синтезируемых при помощи круговых и маятниковых делительных машин.

Таблица 1. Сравнение технологических возможностей круговых и маятниковых делительных машин

№ п/п	Решаемая задача	Круговые делительные машины	Ссылка	Маятниковые делительные машины	Ссылка
1.	Контроль формы асферических поверхностей с осевой симметрией, в том числе с большими крутизной и градиентом асферичности, крупноформатных оптических телескопов наземного и космического базирования	Изготовление ОСГОЭ-оптических компенсаторов диаметром до 600 мм	[1, 2]	Изготовление цилиндрических осевых синтезированных голограммных оптических элементов (ЦОСГОЭ) длиной до нескольких метров в целях получения интерферограммы узкой зоны в заданном диаметральном сечении контролируемой поверхности или её нескольких диаметральных сечениях с последующей «сшивкой» результатов расшифровки полученных интерферограмм	[15–17]
2.	Формообразование светосильных цилиндрических, сферических и тороидальных дифракционных решеток (ДР) спектроскопического применения	Возможности отсутствуют		Получение цилиндрических, сферических и тороидальных ДР на неплоских подложках с большой стрелкой прогиба (более 5 мм)	[9–12]

№ п/п	Решаемая задача	Круговые делительные машины	Ссылка	Маятниковые делительные машины	Ссылка
3.	Контроль юстировки взаимного расположения оптических элементов в составе центрированной оптической системы, в частности, двухзеркального телескопа, как в наземных, так и космических условиях	Нанесение юстировочных ОСГОЭ непосредственно на поверхности вторичного зеркала (ВЗ) диаметром до 600 мм: в пределах всей световой апертуры ВЗ, в виде кольцевых голограмм в краевой зоне ВЗ или в виде системы сегментов – частей кольцевых юстировочных ОСГОЭ; причем эти ОСГОЭ могут быть сформированы на поверхности ВЗ, имеющего небольшие крутизну и градиент асферичности	[2, 18–21]	Нанесение юстировочных ОСГОЭ в виде системы сегментов – частей кольцевых юстировочных ОСГОЭ непосредственно на поверхности ВЗ практически без ограничения на его диаметр; причем эти ОСГОЭ могут быть сформированы на поверхности ВЗ, имеющего большие крутизну и градиент асферичности	
4.	Изготовление безабберационных объективов для работы на лазерной длине волны, в частности, для визуализации газовых потоков больших сечений	Изготовление ОСГОЭ-объективов диаметром до 600 мм	[2, 3]	Изготовление ЦОСГОЭ-матриц на вогнутых подложках цилиндрической формы для получения путем развертывания тонких плоских ЦОСГОЭ-реплик*, реализующих функцию объектива, размерами до 1000×1000 мм**	
5.	Формообразование тонких плоских (компактных и облегченных) концентраторов солнечного излучения для развития систем фотовольтаики наземного и космического применения	Изготовление ОСГОЭ-матриц диаметром до 600 мм для формообразования тонких плоских концентраторов солнечного излучения в виде реплик с круговой симметрией	[4]	Изготовление ЦОСГОЭ-матриц на вогнутых подложках цилиндрической формы для получения путем развертывания тонких плоских ЦОСГОЭ-реплик* с функцией концентраторов солнечного излучения с линейной симметрией размерами до 1000×1000 мм и более**	[13]

№ п/п	Решаемая задача	Круговые делительные машины	Ссылка	Маятниковые делительные машины	Ссылка
6.	Компрессия-декомпрессия мощных лазерных импульсов на основе использования ДР	Возможности отсутствуют		Изготовление ДР-матриц на вогнутых подложках цилиндрической формы для формирования путем развертывания относительно дешевых «одноразовых» крупноформатных ДР-реплик в виде тонких полимерных пленок* размерами до 1000×1000 мм**	[13]
<p>Примечания:</p> <p>1. *За счет использования методов прецизионного реплицирования или тиснения [4, 22, 23].</p> <p>2. **Предельные размеры будут определяться фактическим износом специального алмазного резца при нарезке матрицы в зависимости от заданной частотной характеристики штриховой структуры в пределах её расчетной заштрихованной площади и твердости материала, в котором формируются штрихи, а также требованиями к обеспечению расчетного предельного значения погрешности периода этой структуры.</p>					

Как следует из приведенной таблицы, на основе использования достоинств как круговых, так и маятниковых делительных машин, возможно значительно расширить круг решаемых задач в интересах отечественного оптико-электронного приборостроения и оптической технологии. В настоящее время разрабатываются технические предложения по модернизации имеющихся и созданию новых образцов круговой и маятниковой делительной техники.

Список источников

- [1] Лукин, А. В. Голограммные оптические элементы / А. В. Лукин // Оптический журнал. — 2007. — Том 74. — № 1. — С. 80 – 87.
- [2] Белозёров, А. Ф. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Ч. 1 / А. Ф. Белозёров, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Фотоника. — 2014. — № 4 (46). — С. 12–32.
- [3] Белозёров, А. Ф. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Ч. 2 / А. Ф. Белозёров, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Фотоника. — 2014. — № 5 (47). — С. 30–41.
- [4] ГОСТ Р 59737–2021 Оптика и фотоника. Элементы оптические голограммные синтезированные осевые. Общие технические условия. — М.: Российский институт стандартизации, 2021. — 40 с.
- [5] Патент на изобретение № 2130374 РФ. Делительная машина для изготовления периодических штриховых структур, преимущественно дифракционных решеток (варианты) / А. В. Лукин, А. Н. Мельников. — Заяв. 26.05.1998. — Оpubл. 20.05.1999.

- [6] **Бородин, В. М.** Исследование динамики резцовой каретки делительной машины маятникового типа / В. М. Бородин, А. И. Карпов, В. А. Кренев, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. — 2003. — № 3. — С. 11–16.
- [7] **Мельников, А. Н.** Делительная машина маятникового типа для механического формообразования периодических штриховых структур / А. Н. Мельников. Автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.03.01 / Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева. — Казань, 2005. — 15 с.
- [8] **Лукин, А. В.** Делительная машина маятникового типа для изготовления нарезных периодических рельефно-фазовых структур / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, С. О. Мирумянц // Оптический журнал. — 2007. — Том 74. — № 1. — С. 44–49.
- [9] **Мельников, А. Н.** Технологии формообразования светосильных дифракционных оптических элементов на основе использования делительной техники маятникового типа / А. Н. Мельников // Фотоника. — 2019. — Том 13. — № 5. — С. 468–475. — DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.5.468.475
- [10] **Бажанов, Ю. В.** Новые возможности получения неклассических нарезных дифракционных решеток большой апертуры / Ю. В. Бажанов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2021. — Том 88. — № 9. — С. 44–51. — DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-09-44-51
- [11] **Мельников, А. Н.** Новый подход в задаче формообразования тороидальных дифракционных решёток / А. Н. Мельников // XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сб. научн. трудов. — М.: НИЯУ МИФИ, 2022. — С. 181–182.
- [12] **Мельников, А. Н.** Новые принципы формирования штриховых структур светосильных неклассических нарезных тороидальных дифракционных решёток с применением делительных машин маятникового типа / А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 95–105. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-95-105
- [13] **Мельников, А. Н.** Делительные машины маятникового типа — новые перспективные средства прецизионного формирования с наноразмерной точностью периодических штриховых структур на поверхностях с большой стрелкой прогиба / А. Н. Мельников // HOLOEXPO 2022: XIX международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (Санкт-Петербург, 20–22 сентября): Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 154 – 156.
- [14] **Мельников, А. Н.** Усовершенствование машины для изготовления неклассических дифракционных решёток / А. Н. Мельников // XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сб. научн. трудов. — М.: НИЯУ МИФИ, 2023. — С. 546–547.
- [15] **Мельников, А. Н.** Возможность применения цилиндрических осевых синтезированных голограмм для контроля формы крупногабаритных асферических поверхностей / А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2023. — Том 90. — № 9. — С. 45–54. — DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-09-45-54
- [16] **Патент на изобретение № 2786688 РФ.** Голографическое устройство для контроля формы асферических оптических поверхностей / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов. — Заяв. 01.02.2022. — Опубл. 23.12.2022.
- [17] **Лукин, А. В.** Новые возможности лазерно-голографического контроля процессов сборки и юстировки крупноформатных составных зеркал телескопов / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 80–94. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-80-94

- [18] **Патент на изобретение № 2467286 РФ.** Устройство юстировки двухзеркальной центрированной оптической системы / В. А. Балоев, В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов, А. М. Ураскин, Ю. П. Чугунов. — Заяв. 06.06.2011. — Опубл. 20.11.2012.
- [19] **Балоев, В. А.** Прецизионный метод контроля юстировки двухзеркальных телескопов на основе использования системы кольцевых синтезированных голограмм / В. А. Балоев, В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов, А. М. Ураскин, Ю. П. Чугунов // Оптический журнал. — 2012. — Том 79. — № 3. — С. 56–64.
- [20] **Baloev, V. A.** Alignment control of twomirror telescopes using a system of annular computer-generated holograms / V. A. Baloev, V. P. Ivanov, N. P. Larionov, A. V. Lukin, A. N. Melnikov, A. F. Skochilov, A. M. Uraskin, Yu. P. Chugunov // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2014. — Vol. 23. — No. 2. — P. 104–110. — DOI: 10.3103/S1060992X14020076
- [21] **Larionov, N. P.** Laser and holographic stand for the alignment control of Cassegrain and Ritchey-Chretien telescopic systems / N. P. Larionov, A. V. Lukin, A. N. Melnikov, A. M. Uraskin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2014. — Vol. 23. — No. 4. — P. 254–258. — DOI: 10.3103/S1060992X14040055
- [22] **Ахметов, М. М.** Научно-производственный комплекс серийной прецизионной репликации элементов асферической и дифракционной оптики / М. М. Ахметов, А. Ф. Белозёров, В. А. Балоев, А. А. Белокопытов, И. С. Гайнутдинов, В. П. Иванов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, И. А. Могилюк // Контенант. — 2016. — Том 15. — № 3. — С. 39–42.
- [23] **Лукин, А. В.** Прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей – научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 42–50. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-42-50.

Circular and pendulum-type ruling engines: a versatile, nanometric precision tool for manufacturing ruled structures of various purposes for modern optical-electrical instrument engineering and optical technology

A. N. Melnikov

JSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

This report examines the relevant issues of optical-electrical instrument engineering and optical technology, which are solved in an optimal way via using ruled structures synthesized by circular and pendulum-type ruling engines.

Keywords: Circular ruling engine, Pendulum-type ruling engine, Ruled structure, Manufacturing technology, Nanometric precision, Field of application.

Изготовление цветовой калибровочной меры для компьютеризированного гистологического анализа

Г. Р. Сагателян, Е. Р. Пискунова, А. С. Кузнецов

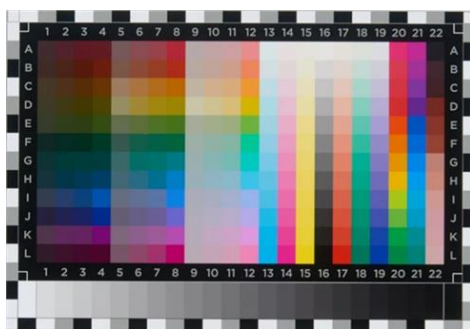
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Разработаны конструкция и технологический процесс мелкосерийного производства цветовой калибровочной меры для корректировки показаний, считываемых с ПЗС-матрицы компьютеризированных оптических микроскопов перед проведением гистологического анализа биотканей в автоматическом режиме. В отличие от применяемых в настоящее время аналогов, изготовленных на полимерном носителе, разработанная калибровочная мера создана на основе применения стандартизованных оптических цветных стёкол. Это позволяет идентифицировать реальные цвета гистологических красителей при больших увеличениях, избегая ошибок, связанных с зернистостью изображения, создаваемой пигментами эмульсии окрашенных полимеров. Разработанный технологический процесс включает разрезание пластин на прямоугольные длиной 4 мм, толщиной 1 мм и шириной 2-5 мм, их двухстороннюю групповую шлифовку и полирование с использованием промежуточного носителя и наклеивание на два покровных стекла. В результате создаётся набор цветных полей в габаритах предметного стекла 75×25 мм толщиной 2 мм.

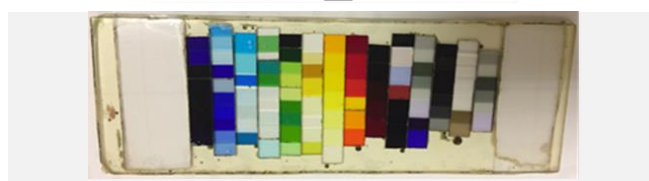
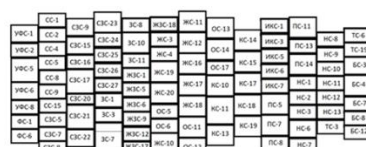
Ключевые слова: Оптическая микроскопия, гистологический анализ, цветные калибровочные меры, цветные оптические стёкла, предметные и покровные стёкла, склеивание бальзаминном; двухсторонняя шлифовка; двухстороннее полирование.

Цитирование: Сагателян, Г. Р. Изготовление цветовой калибровочной меры для компьютеризированного гистологического анализа / Г. Р. Сагателян, Е. Р. Пискунова, А. С. Кузнецов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 347–350.

Автоматизированная калибровка оптических микроскопов при поведении компьютеризированного гистологического исследования и анализа биотканей невозможна без применения цветных эталонов (цветных калибровочных мер). В настоящее время в этих целях используют стандартизованные калибровочные меры (КМ), предназначенные для настройки цветных принтеров [1]. Такие КМ изготавливают на основе окрашенных полимерных плёнок, что создаёт принципиальные затруднения идентификации цвета при характерных для гистологии больших увеличениях вследствие создания пигментами красок зернистой структуры на изображении эталона. Для решения данной проблемы предлагается вместо КМ на окрашенной полимерной основе (рис. 1, а), разработать и изготавливать КМ на основе цветных оптических стёкол (рис. 1, б).



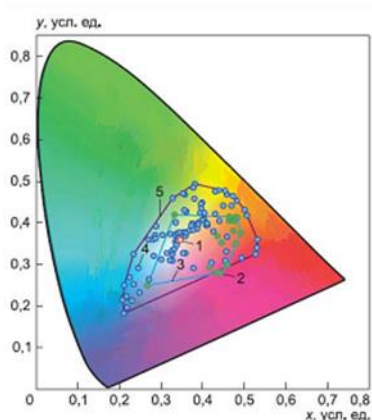
а)



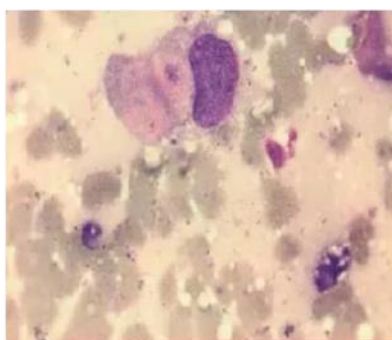
б)

Рис. 1. Цветовые калибровочные меры: IT8 эталон, изготовленный окрашиванием полимера (а) и набор полей, составленных из комплекта цветных оптических стёкол (б) [2]

Целью калибровки цвета является измерение и настройка цветового отклика устройства до известного состояния, которое задаётся диаграммой цветности x_u (рис. 2, а), построенной для стандартного осветителя D_{50} . Первым шагом настройки оптической системы микроскопа является задание цвета в виде координат стандартного белого для стандартного осветителя с минимизацией отклонения реально считанного сигнала, содержащего искажения, обусловленные применением конкретного осветителя микроскопа в сочетании со спектром чувствительности его ПЗС-матрицы. Внесённые поправки координат запоминаются. Далее считывается сигнал с поля КМ, цвет которого расположен наиболее близко к цвету использовавшегося красителя на диаграмме (см. рис. 2, а). Стандартные координаты этого цвета известны из проведённых ранее исследований [2].



а)



б)



в)

Рис. 2. Диаграмма цветности (а), окрашивание цитоплазмы при коллоидном раке (б) и набор цветных стёкол для светофильтров оптических приборов (в): 1 – точка белого для стандартного осветителя D_{50} ; 2 – координаты цветности гистологических красителей; 3 – целевая область для разработки гистологических КМ; 4 – координаты цветности стёкол набора; 5 – область идентифицируемых разработанной КМ цветов

Рассчитываются отклонения цветовых координат считанного сигнала от стандартных для данного поля. Краситель оказывается идентифицированным, если отклонения цветовых координат, считанные с красителя, оказываются не более соответствующих отклонений

ближайшего цветового поля КМ. Технологический процесс мелкосерийного производства разработанных КМ может быть реализован как в производственных, так и в лабораторных условиях. Он включает следующие основные технологические операции:

- склеивание стёкол набора в пачки (рис. 3, а). Стандартным размер стёкол 40x40 мм, а толщина их различна и составляет 2 – 6 мм. Пачки получаются разновысотными, но их высота не должна превышать ширины стандартного предметного стекла размером 75x25 мм;

- разрезание пачек на полосы (рис. 3, б). Ширина полос из соображений технологичности одинакова и принята равной 4 мм с тем, чтобы обеспечить размещение на стандартном предметном стекле все стёкла набора. Формируются комплекты полос (рис. 3, в) из склеенных цветовых полей;

- наклеивание двух комплектов полос на два предметных стекла с в соответствии с эскизом на рис. 1, б с последующим склеиванием обоих предметных стёкол по свободным от цветовых полей поверхностям. Образуются склеенные сборочные единицы (блоки), содержащие обращённые наружу два комплекта цветовых полей, наклеенных на сердцевину, образованную двумя склеенными предметными стёклами;

- групповая двухсторонняя доводка (шлифовка), выполняемая на станке эксцентриковом станке настольного исполнения, описанном в работе [3]. Доводимая группа состоит из шести заготовок, размещённых по две в трёх сепараторах диаметром 100 мм, которые, в свою очередь, размещают в общем сепараторе. Одновременно доводятся шесть заготовок, из которых в дальнейшем получают двенадцать КМ;

- двухстороннее полирование на станке, прототип которого описан в работе [3]. Станок позволяет полировать одновременно два блока, размещённых в описанном выше сепараторе диаметром 100 мм;

- переблокировка, заключающаяся в расклеивании друг от друга предметных стёкол, наклеивании на отполированные поверхности наборов цветовых полей покровных стёкол размером 25x75 мм, отклеивании предметных стёкол от своих наборов цветовых полей и склеивании между собой двух покровных стёкол с образованием новых блоков.

- повторение операций шлифовки и полирования;

- расклеивание друг от друга склеенных ранее покровных стёкол и наклеивание по второму предметному стеклу на только что отполированные поверхности наборов цветовых полей.

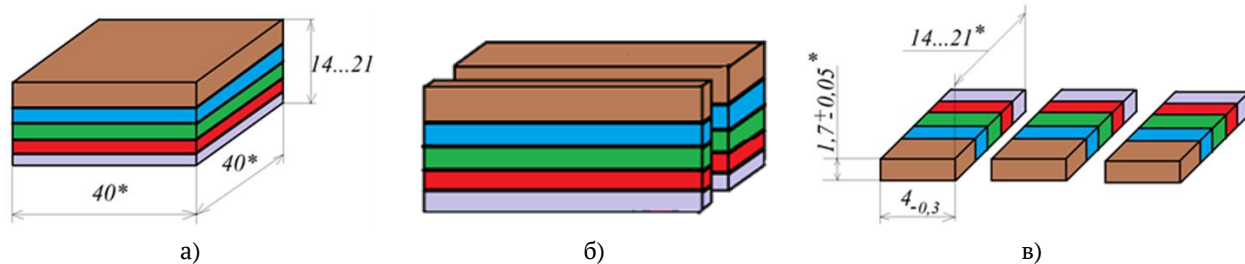


Рис. 3. Склеивание стёкол набора в пачку (а), разрезание пачки (б) и полученные полосы (в)

Таким образом, аналитически обоснована возможность применения для изготовления цветowych полей калибровочной меры стёкол из набора цветowych фильтров оптических приборов. Показана возможность мелкосерийного производства в лабораторных условиях калибровочных мер, создающих достаточное количество полей в требуемом цветовом диапазоне, используя набор из 97 светофильтров, представляющих собой плоскопараллельные пластины из оптических стёкол с известными спектрами пропускания размером 40x40 мм.

Список источников

- [1] **ISO 12641:2016-1.** Graphic technology - Prepress digital data exchange – Color targets for input scanner calibration - Part 1: Color targets for input scanner calibration.
- [2] **Махов, Д. С.** Цветовая мера для калибровки систем цифровой микроскопии / Д. С. Махов, Г. Р. Сагателян, А. В. Самородов // Измерительная техника. – №10, 2021. – С. 60 – 63.
- [3] **Сагателян, Г. Р.** Станок новой конструкции для двухстороннего полирования оптических плоскопараллельных пластин прямоугольной формы / Г. Р. Сагателян, Е. Р. Пискунова, Н. Н. Дубовик, А. С. Кузнецов // HOLOEXPO 2022: Тезисы докладов. XIX международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, Санкт-Петербург, 20–22 сентября 2022 года. – Барнаул: Индивидуальный предприниматель Колмогоров Игорь Александрович, 2022. – С. 435-440. – EDN VEBGFG.

Making of the color target for computerized histological analysis

G. R. Sagatelian, E. R. Piskunova, A. S. Kuznetsov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The design and technological process of small-scale production of a color calibration standard for correcting the readings read from the CCD array of computerized optical microscopes before conducting histological analysis of biological tissues in an automatic mode have been developed. Unlike currently used analogues made on a polymer carrier, the developed calibration standard was created on the basis of the use of standardized optical colored glasses. This makes it possible to identify the real colors of histological stains at high magnifications, avoiding errors associated with the graininess of the image created by the pigments of the colored polymer emulsion. The developed technological process includes cutting the plates into rectangular plates 4 mm long, 1 mm thick and 2-5 mm wide, their double-sided group grinding and polishing using an intermediate carrier, and gluing onto two cover slips. As a result, a set of color fields is created, in the dimensions of a standard glass slide 75x25 mm 2 mm thick.

Keywords: Optical microscopy, Histological analysis, Color calibration standards, Colored optical glasses, Slides and coverslips, Balsam bonding; Double-sided grinding; Double sided polishing.

Новые старые технологии полутоновой литографии

В. П. Корольков¹, Р. И. Куц¹, Д.Е. Зайцева^{1,2}, С. К. Голубцов¹, А. Р. Саметов¹, В. В. Черкашин¹

¹ Институт автоматки и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Полутоновая литография широко используется при формировании многоуровневого рельефа в технологиях дифракционных и микрооптических элементов путем модуляции распределения дозы экспозиции фоторезиста. Для растриваемых полутоновых фотошаблонов требуется дорогая установка проекционной фотолитографии, имеющая ограниченный размер светового поля в пределах 8-20 мм, в то время как для действительно полутоновых фотошаблонов (ДПФ) достаточно установки контактной фотолитографии (типичное световое поле ≥ 100 мм) или просто источника УФ излучения с широким однородным пучком. В докладе рассмотрены методы изготовления и применения ДПФ, как на основе изменения коэффициента поглощения, так и формирования 3D рельефа на поглощающей плёнке. Представлены примеры применения методов к формированию дифракционного микрорельефа.

Ключевые слова: Полутоновая литография, Фоторезист, Дифракционные оптические элементы, Микрооптика, Полутоновой фотошаблон, Растриваемый полутоновой фотошаблон.

Цитирование: Корольков, В. П. Новые старые технологии полутоновой литографии / В. П. Корольков, Р. И. Куц, Д. Е. Зайцева, С. К. Голубцов, А. Р. Саметов, В. В. Черкашин // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 351–359.

Введение

Полутоновая литография с применением действительно полутоновых (а не растриваемых) фотошаблонов (ДПФ) является многообещающим направлением в развитии технологии массового производства дифракционных оптических элементов (ДОО). Полутоновая литография применима как для многократной контактной печати без зазора (в отличие от фоторастрового метода), так и для проекционной печати с уменьшением. Однако с момента появления первых публикаций о ДПФ прошло уже больше 30 лет [1], а широкого применения они так и не получили. Проблема состоит в трудности и высокой стоимости воспроизводимого изготовления полутоновых фотошаблонов. ДПФ на основе материалов, в которых коэффициент пропускания тонкого поверхностного слоя меняется под воздействием сфокусированного лазерного пучка создаются с применением довольно широкого ряда материалов: пленок негидрогенизированного аморфного кремния [1], биметаллических соединений типа BiIn [2], олова [3], стекол с модифицированным поверхностным слоем - LDW-стекла [4] для лазерной записи. К недостаткам этих материалов относится их нестандартность, а также обратное воздействие изменяемого пропускания на поглощение энергии записывающего пучка, которое создает различные артефакты типа оконтуривания [5] дифракционных зон и зависимости передаточной функции от знака

градиента пропускания [5]. Другой вариант создания ДПФ основывается на изменении толщины поглощающей пленки. В настоящей работе основное внимание уделяется именно этому типу ДПФ и его применению для изготовления многоуровневых дифракционных оптических элементов (МДОЭ).

1. Методы изготовления ДПФ с изменением толщины пленки

Принцип работы действительно полутонного шаблона с изменением толщины пленки (ДПФИТП) основывается на том, что коэффициент пропускания поглощающей пленки (ПП) зависит от ее толщины d пропорционален $\exp(-\alpha d)$, где α - коэффициент поглощения ПП. Изменение толщины ПП возможно жидкостным или «сухим» травлением через маску, либо локальной абляцией пленки импульсным лазерным излучением. Для формирования ступенчатого распределения коэффициента пропускания возможно также применение многократного напыления ПП через совмещаемые фоторезистные маски, сформированные на подложке [6]. Этот подход, использующий взрывную литографию, чрезвычайно трудозатратен и чувствителен к ошибкам совмещения слоев. Для некоторых задач, не требующих высокого пространственного разрешения, может быть применен аддитивный метод выращивания ПП из газовой фазы при локальном стимулировании процесса сфокусированным лазерным излучением (laser chemical vapor deposition – LCVD) [7] или осаждением из жидкой фазы [8]. Однако эти способы проходят при низкой скорости сканирования и требуют материала подложки с высоким поглощением на длине волны записывающего лазера.

Существенным прикладным потенциалом в сложившейся ситуации обладают методы, основанные на термохимической технологии локального лазерного окисления. Так сквозное окисление пленок титана [9] позволяет получать изменение коэффициента пропускания по крайней мере в 10 раз, но эта зависимость не монотонна (рис.1) и процесс ограничен скоростью сканирования примерно 200 см/сек.

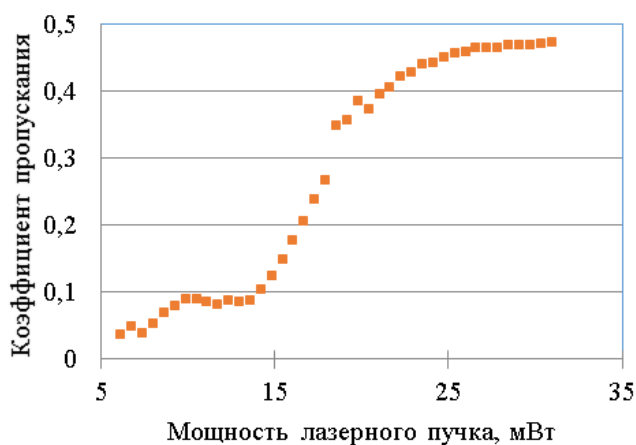


Рис. 1. Зависимость коэффициента пропускания пленки титана (исходное пропускание 0,04) от мощности лазерного пучка (диаметр 0,7 мкм) при скорости сканирования 38 см/сек

Для формирования пропускающего микроизображения известен метод прямой лазерной записи на тонких пленках хрома с применением селективного травителя [10]. Ранее была продемонстрирована возможность применения его для полутонковых микроизображений [11].

2. Технологические этапы

Примененная нами методика создания ДПФИТП состоит из трех основных этапов, схематично изображенных на рис. 2. Первый этап – нанесение пленки хрома толщиной 30-50 нм. Следующий этап – прямая лазерная запись с изменяемой мощностью, после которой образуется скрытое изображение из оксида хрома (2). Заключительный этап – проявление топологии ДПФИТП в селективной травителе.

3. Методика эксперимента и результаты

Пленки хрома толщиной 30-50 нм наносятся на стеклянную подложку методом магнетронного ионного напыления. Прямая лазерная запись производится на установке круговой лазерной записывающей системы (КЛЗС) CLWS-300IAE [12] с длиной волны записывающего лазера 532 нм и диаметром записывающего пятна около 0,7 мкм. Оксид может формироваться не только на поверхности пленки, но и по всему объему. Это помогает увеличить динамический диапазон фотошаблона, но в то же время снижает максимально достижимую оптическую плотность. Сформированная оксидная маска переменной толщины на поверхности и модифицированный хром внутри объема пленки служат маскирующим покрытием при последующем селективном травлении [10].

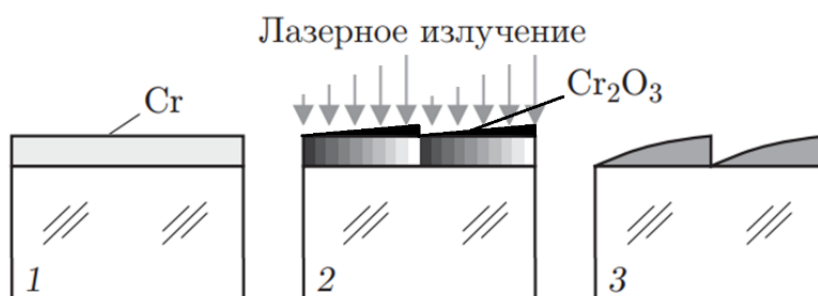


Рис. 2. Технологические этапы изготовления ДПФИТП (1 – напыление пленки хрома, 2 – формирование оксидной маски локальным лазерным нагревом, 3 – селективное травление через оксидную маску)

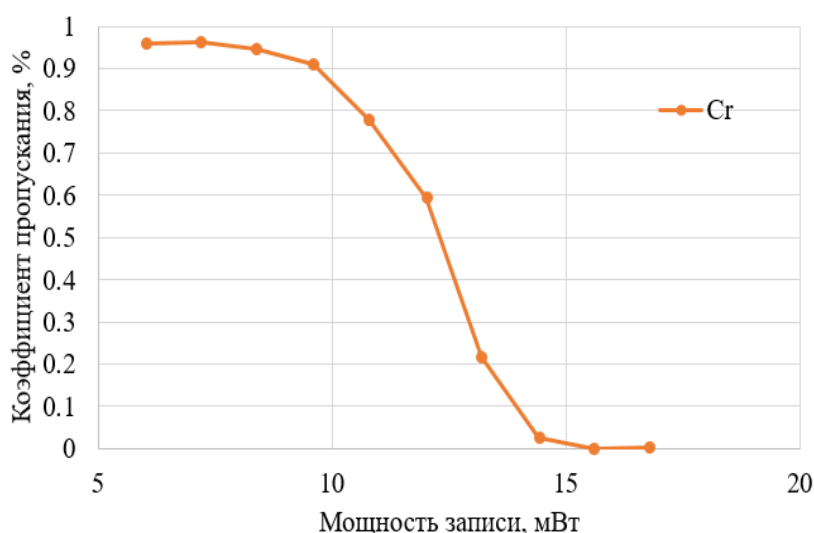


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания пленки хрома (исходное пропускание 0,01) от мощности лазерного пучка (диаметр 0,7 мкм) при импульсной записи с шагом 0,25 мкм и длительностью импульсов 2 мкс

Перед записью ДПФИТП на первом образце из напыленной серии необходимо определить критическую мощность записи, ниже которой реализуется режим термохимического окисления, а выше происходит плавление и абляция пленки. После определения критической мощности записывается калибровочный тест, представляющий собой линейный градиент. После снятия с КЛЗС образец проявляется в селективном травителе хрома. С помощью оптического микроскопа, работающего в режиме пропускания, фиксируется изображение проявленной тестовой структуры. Обработка полутонового изображения, нормированного на изображение поверхности стеклянной пластины без покрытия, позволяет получить характеристическую функцию (Рис. 3), которая затем используется при следующей записи как таблица LOOK-UP-TABLE пересчета номера фазового уровня в микроструктуре ДОЭ, для которого изготавливается ДПФИТП, в величину управляющего сигнала для модулятора мощности лазерного излучения в КЛЗС. При повторной записи производится корректировка LOOK-UP-TABLE и записывается топология конечного ДПФИТП. При этом рядом с рабочей зоной шаблона одновременно формируется при тех же условиях градиентная тестовая структура для контроля повторяемости характеристической функции. Максимальный контраст полутонового микроизображения на пленке хрома составил порядка 10. В предельном случае контраст ограничивается коэффициентами пропускания исходной пленки и стекла. Однако на практике полностью удалить хром не получается, так как в этом случае трудно обеспечить воспроизводимость формирования топологии ДПФИТП.

На рис. 4 показаны примеры микроизображений, сформированных по разработанной технологии.

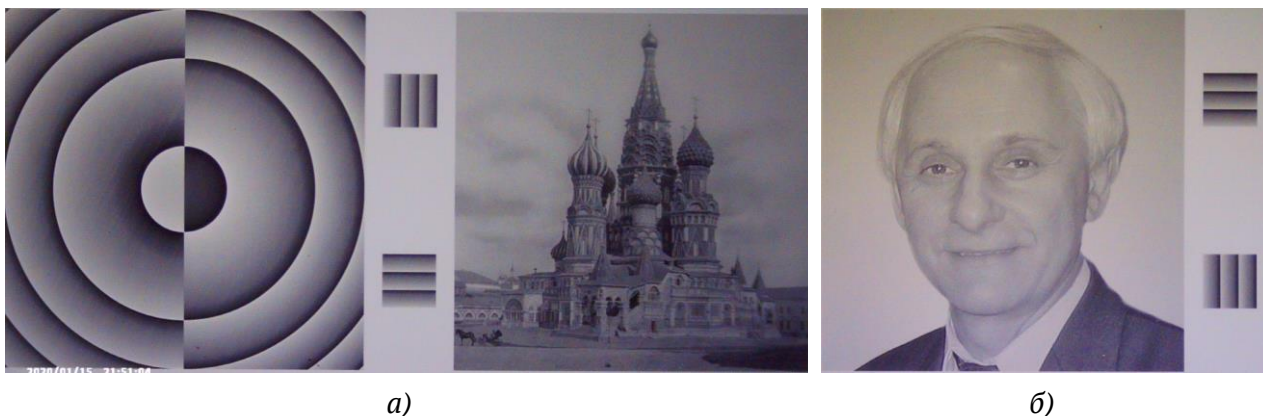


Рис. 4. Примеры микроизображений на пропускание, записанные на пленках хрома: а – комбинация фрагментов положительной и отрицательной дифракционных линз, б – фотография собора Василия Блаженного начала 20 века, в – автор технологии записи полутоновых фотошаблонов на пленках хрома А. Г. Полещук

Эксперименты по применению ДПФИТП для полутоновой литографии

Исследования применения хромовых ДПФИТП проводилась с использованием линейных тестовых решеток фрагмент которых показан на рис. 5.

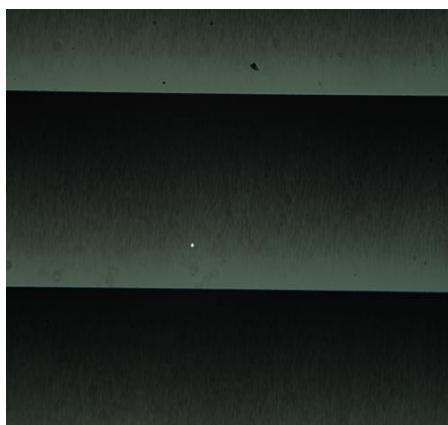


Рис. 5. Фрагмент полутонового изображения тестовой решетки с периодом 100 мкм

На стеклянную подложку методом центрифугирования при частоте вращения 3000 об/мин и длительности вращения 40 секунд наносился фоторезист ФП-3535 (производства ФРАСТ-М). С целью увеличения толщины конечной пленки фоторезист наносился в два слоя после промежуточной сушки. Толщина пленки измерялась сравнением сдвига интерференционных полос света, отраженного от поверхности пленки и подложки в царапине, с помощью интерферометра белого света WLI (BMT). В результате были получены пленки толщиной 9 мкм.

Экспонирование пленки фоторезиста осуществлялось через ДПФИТП на установке контактной фотолитографии, оснащенной светодиодным матричным источником с длиной волны 405 нм. Функция пропускания фотошаблона от заданного фазового уровня показана на рис. 6. Заметна нелинейность в пределах 10%.

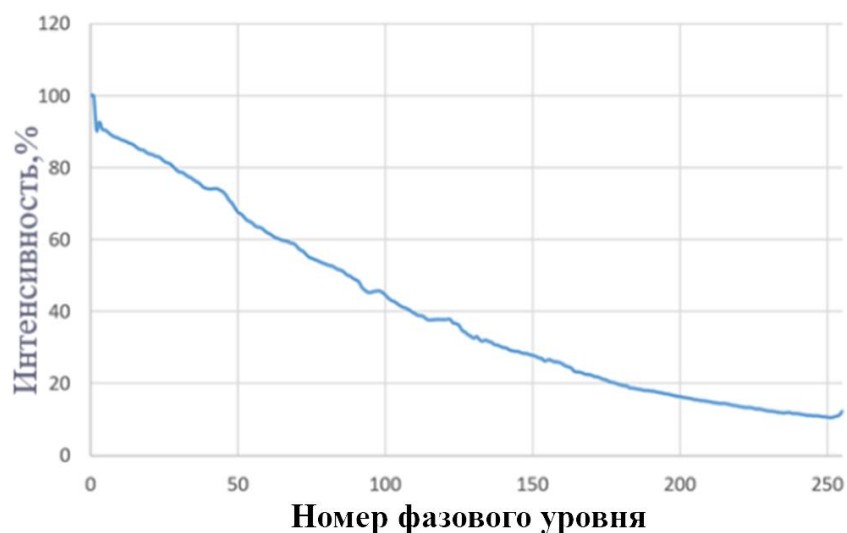


Рис.6. Зависимости интенсивности прошедшего через ДПФИТП света от номера фазового уровня

После экспонирования засвеченные участки фоторезиста удаляются в результате проявления изображения в щелочном растворе КОН 0.8% в течение 2 минут, таким образом изображение ДПФИТП переносится в 3D распределение глубины на поверхности фоторезиста. В результате был получен пилообразный дифракционный микрорельеф глубиной 4.3 мкм. Аппроксимированная глубина (красная линия) составила почти 5 мкм.

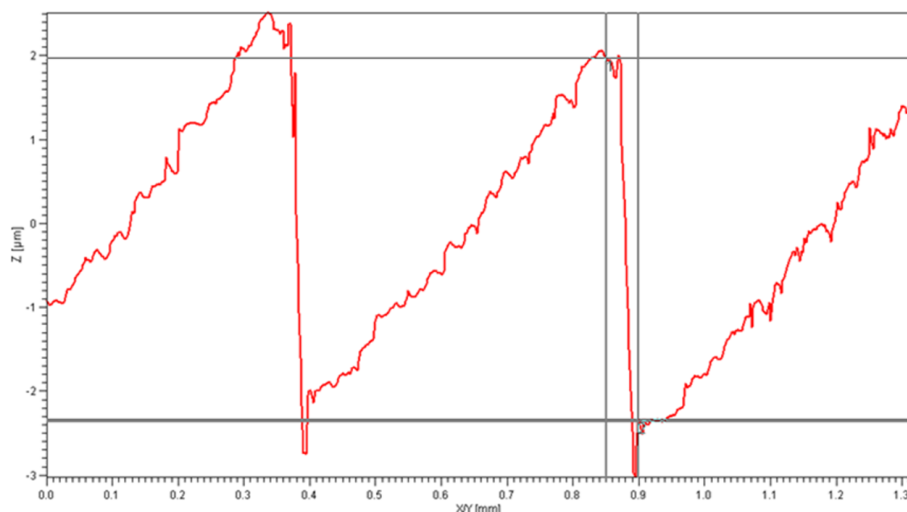


Рис. 7. Профилограмма пилообразного микрорельефа, сформированного на поверхности фоторезиста

С помощью сканирующего электронного микроскопа ТМ-3000 (Hitachi) был получен СЭМ-снимок микрорельефа на обратном скате пилообразных дифракционных зон (рис.9) в фоторезисте, нанесенном на кремниевую подложку. На скол фоторезиста напылялся тонкий слой золота толщиной 30 нм.

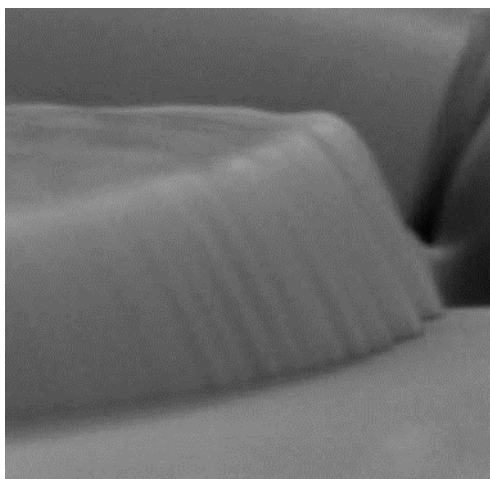


Рис.9. СЭМ-снимок скола микрорельефа

Анализ СЭМ-снимка показал, что величина обратного ската составляет 2.3 мкм, а угол его наклона, равен примерно 60°. Эти параметры необходимы для дальнейшей коррекции структуры ДПФИТП на границе дифракционных зон на основе метода приграничной оптимизации [12] с целью компенсации искажений рельефа, снижающих дифракционную эффективность.

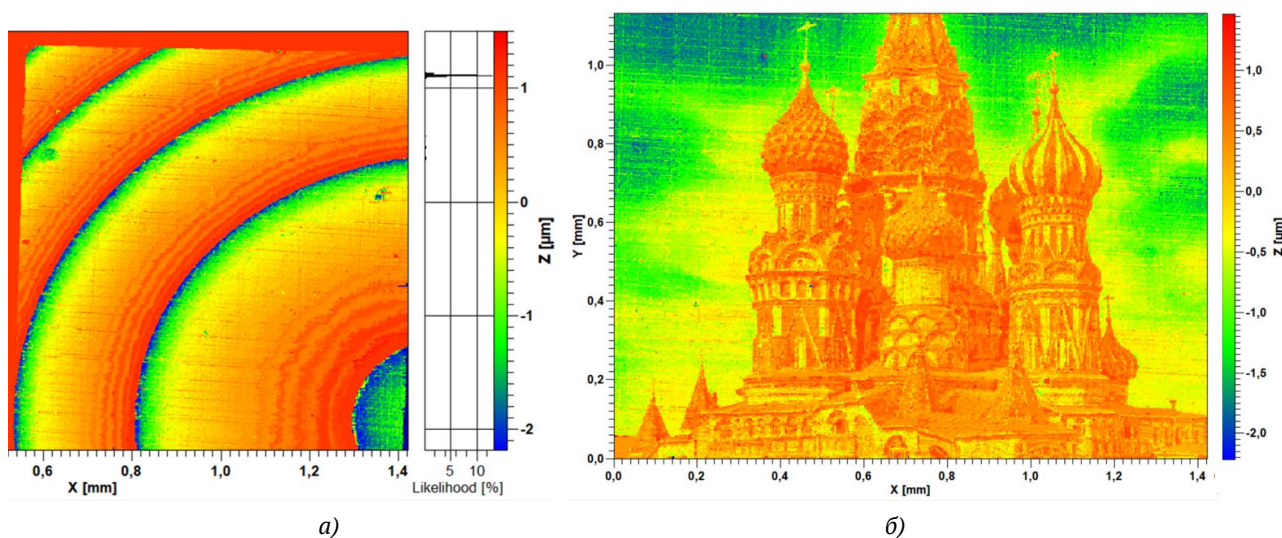


Рис. 10. Примеры 3D профилограмм дифракционного микрорельефа (а) и микробарельефа храма Василия Блаженного (б), изготовленного по шаблона, показанному на рис. 4, б

Заключение

Исследован метод полутонковой термохимической записи действительно полутонковых фотошаблонов на тонких пленках хрома с максимальным контрастом до 10 раз. Исследовано применение пропускающих полутонковых фотошаблонов, сформированных термохимической лазерной записью на пленках хрома, для формирования многоуровневых ДОЭ путем полутонковой литографии. Впервые получены многоуровневые дифракционные оптические элементы контактным копированием хромового полутонкового фотошаблона на фоторезист. Показана возможность получения многоуровневого рельефа в фоторезисте

глубиной свыше 4 мкм. Экспериментально определен угол наклона обратных скатов пилообразных дифракционных зон. Метод может быть использован для создания 3D микрорельефов различного назначения.

Благодарность

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания (№ гос. регистрации 121041500060-2). В исследованиях использовано оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН и ЦКП ВТАН НГУ.

Список источников

- [1] **Гочияев, В. З.** Полутоновая оптическая запись на пленках a-Si / В. З. Гочияев, В. П. Корольков, А. П. Соколов, В. П. Чернухин // Квантовая электроника. — 1989. — Том 16. — № 11. — С. 23–43.
- [2] **Chapman, G. H.** Creating Direct-write Grayscale Photomasks with Bimetallic Thin Film Thermal Resists/ G.H. Chapman, Y. Tu, J. M. Dykes, M. Mio and J. Peng // SPIE Proc. — 2003. — 5256.— P. 400-411.
- [3] **Guo, C. F.** Grayscale photomask fabricated by laser direct writing in metallic nano-films/ C. F. Guo, S. Cao, P. Jiang, Y. Fang, J. Zhang, Y. Fan, Y. Wang, W. Xu, Z. Zhao, and Q. Liu // Opt. Express. — 2009. — Vol.17. — P.19981-19987.
- [4] **Korolkov, V. P.** Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs/ V. P. Korolkov, A. I. Malyshev, V. G. Nikitin, A. G. Poleshchuk, A. A. Kharissov, V. V. Cherkashin, C. Wu, Proc. SPIE 3633. — 1999. — P.129-138.
- [5] **Korolkov, V. P.** Fabrication of gray-scale masks and diffractive optical elements with LDW glass/ V. P. Korolkov, A. I. Malyshev, A. G. Poleshchuk, V. V. Cherkashin, H.J. Tiziani, C. Pruss, T. Schoder, J. Westhauser, C. Wu // Proc. SPIE 4440. — 2001. — P.73-84.
- [6] **Morton, S. G.** Optical device bearing a pattern for representing at least one image that is capable of having microscope detail/ Patent USA 5,567,573. — 1995.
- [7] **Mahamood, R. M.** Laser-assisted additive fabrication of micro-sized coatings. In: Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Application/ R.M. Mahamood, E.T. Akinlabi. Elsevier Inc., 2018. — P.635-664.
- [8] **Lan, C.-J.** Direct Silver Micro Circuit Patterning on Transparent Polyethylene Terephthalate Film Using Laser-Induced Photothermochemical Synthesis/ C.-J. Lan, S.-L. Tsai, M.-T. Lee // Micromachines. — 2017. — 8. — P. 52. — DOI: 10.3390/mi8020052.
- [9] Korolkov, V. P., Nasyrov R.K., Sametov A.R., Malyshev A.I., Belousov D.A., Mikerin S.L., Kutz R.I. Direct laser writing of high-NA computer-generated holograms on metal films of the titanium group and chromium // Proceedings of SPIE: vol. 11188: Holography, Diffractive Optics and Applications IX. — 2019. — Paper. 111880R. — DOI 10.1117/12.2537269.
- [10] **Коронкевич, В. П.** Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома / В. П. Коронкевич, А. Г. Полещук, Е. Г. Чурин, Ю. И. Юрлов // Письма в ЖТФ, — 1985. — Том 11. — № 3. — С. 144–148.
- [11] **Полещук, А. Г.** Прямая лазерная запись в пленках хрома полутоновых микроизображений с большим динамическим диапазоном / А. Г. Полещук, В. П. Корольков, А. Г. Седухин, А. Р. Саметов, Р. В. Шиманский // Автотметрия. — 2015. — Том 51. — № 3. — С. 87–93.
- [12] **Korolkov, V. P.** Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements / V. P. Korolkov, R. K. Nasyrov, R. V. Shimansky // Applied Optics. — 2006. — Vol. 45. — No. 1. — P. 53-62.

New old technology of gray-scale lithography

V. P. Korolkov¹, R. I. Kuts¹, D. E. Zaitseva^{1,2}, S. K. Golubtsov¹, A. R. Sametov¹, V. V. Cherkashin¹

¹ Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Gray-scale lithography is widely used in the formation of a multilevel profile in the technologies of diffractive and microoptical elements by modulating the distribution of the photoresist exposure dose. Halftone (rasterized) masks require an expensive projection photolithography setup that has a limited light field size of 8-20mm, while true grayscale masks (GSMs) require a contact printer (typical light field ≥ 100 mm) or even just a UV source radiation with a wide homogeneous beam. The report discusses the methods of manufacturing and using GSMs, both on the basis of changing the absorption coefficient and the formation of a 3D profile on an absorbing film. Examples of the implementation of DOEs fabricated using grayscale lithography are presented.

Keywords: Gray-scale lithography, Gray-scale masks, Direct laser writing, Chromium films, Laser oxidation, Diffractive optical elements.

Формирование синусоидальных голографических решеток методом сухого электронно-лучевого травления резиста

Ф. А. Сидоров, А. Е. Рогожин

Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН, Москва, Россия

Метод сухого электронно-лучевого травления резиста (СЭЛТР) основан на цепной реакции термической деполимеризации, протекающей при экспонировании позитивного полимерного резиста электронным лучом при температурах выше температуры стеклования резиста и обеспечивающей формирование рельефа непосредственно при экспонировании. Одной из особенностей данного метода является возможность высокопроизводительного формирования в резисте волнообразного профиля при экспонировании вдоль серии параллельных линий. На основе моделирования процесса СЭЛТР было установлено, что при правильном подборе параметров экспонирования в резисте ПММА могут быть получены синусоидальные решетки с плотностью штрихов до 2000 1/мм и глубиной профиля до 200 нм. Среднеквадратичное отклонение вершин поверхности решеток от функции синус при этом составляет менее 5 %.

Ключевые слова: Термическая деполимеризация резиста, Сухое электронно-лучевое травление резиста, Дифракционные оптические элементы.

Цитирование: Сидоров, Ф. А. Формирование синусоидальных голографических решеток методом сухого электронно-лучевого травления резиста / Ф. А. Сидоров, А. Е. Рогожин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 360–362.

Введение

Основным методом формирования синусоидальных голографических решеток в настоящее время является интерференционная литография. Однако, в качестве альтернативного высокопроизводительного метода может рассматриваться сухое электронно-лучевое травление резиста (СЭЛТР) [1]. Метод СЭЛТР основан на цепной реакции термической деполимеризации, протекающей при экспонировании позитивного полимерного резиста электронным лучом при температурах выше температуры стеклования резиста. Протекающие в этих условиях электронно-стимулированные разрывы молекул резиста инициируют реакцию цепной термической деполимеризации, что приводит к появлению в резисте большого количества свободного мономера. Вследствие диффузии мономер покидает область травления, обеспечивая формирование полостей в резисте, которые впоследствии заполняются резистом за счет его релаксации. Это приводит к формированию в резисте рельефа со сглаженным профилем непосредственно на стадии экспонирования. Экспериментально было установлено, что экспонирование вдоль серии параллельных линий (“в кадр”) приводит к формированию в резисте решетки с профилем, близким к синусоидальному (рис. 1).

1. Моделирование синусоидального профиля, получаемого методом сухого электронно-лучевого травления резиста

Для моделирования профиля рельефа, получаемого методом СЭЛТР, использовался алгоритм, учитывающий основные протекающие процессы – электронно-стимулированные разрывы молекул резиста, деполимеризацию резиста, диффузию мономера и процессы растекания. На этапе моделирования растекания слой резиста с полостями приближался сплошной пилообразной поверхностью, для которой в дальнейшем моделировалось растекание методом конечных элементов [2]. На рис. 2 приведены промоделированные профили, полученные методом СЭЛТР в слое полиметилметакрилата (ПММА) с начальной толщиной 500 нм. Температура образцов составляла 150 °С, плотность тока экспонирования на единицу длины линии – 30 пА. Результаты моделирования показали, что при правильном подборе остальных параметров процесса СЭЛТР (ширина пучка, время экспонирования, скорость охлаждения образца) в ПММА могут быть получены синусоидальные решетки с плотностью штрихов до 2000 1/мм и глубиной рельефа до 200 нм. При этом максимальное отклонение точек промоделированного профиля от графика функции синус составляет менее 5 нм. Синусоидальный рельеф, полученный в ПММА, в дальнейшем может быть покрыт металлом либо перенесен в металл путем травления в реакторе индуктивно связанной плазмы [1].

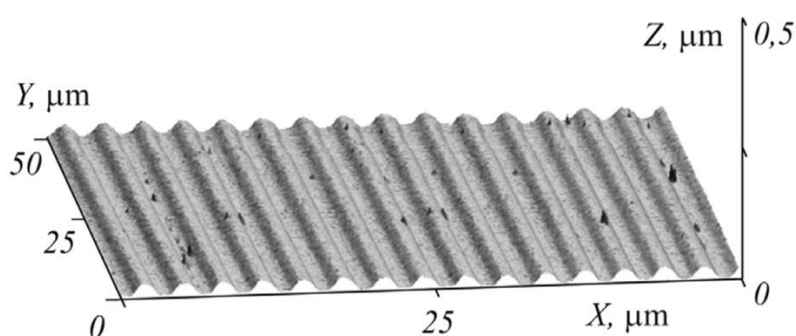
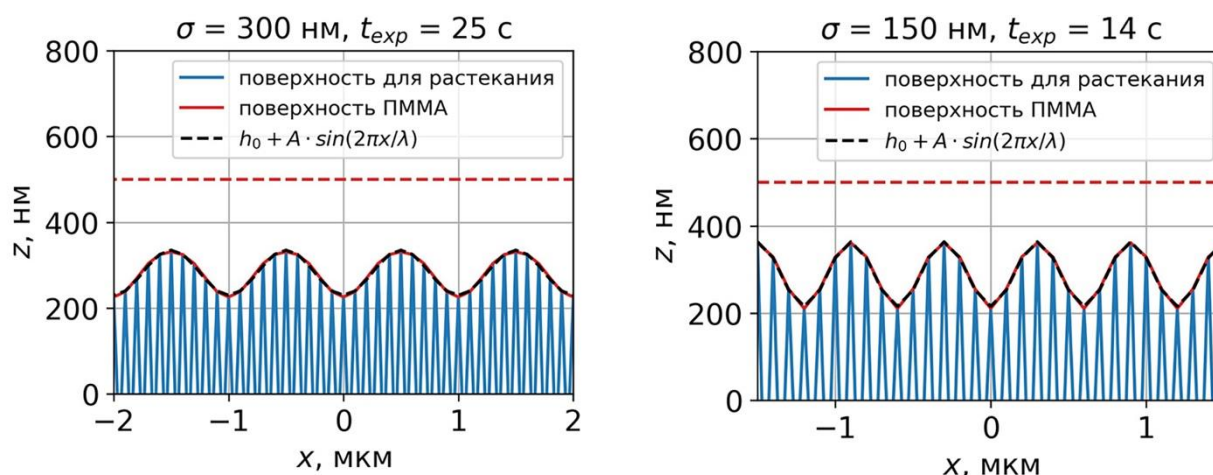


Рис. 1. Пример синусоидальной решетки, полученной в ПММА методом СЭЛТР [1].

Заключение

В данной работе моделируется применение метода СЭЛТР для получения в ПММА синусоидальных голографических решеток. Моделирование профиля решеток, получаемых при экспонировании “в кадр”, показало, что при правильном подборе параметров методом СЭЛТР могут быть получены решетки с плотностью штрихов до 2000 1/мм и глубиной рельефа до 200 нм.



а) Моделирование профиля синусоидальной решетки с периодом 1 мкм

б) Моделирование профиля синусоидальной решетки с периодом 0,8 мкм

Рис. 3. Результаты моделирования профиля синусоидальных решеток, полученных методом СЭЛТР в слое ПММА при различных условиях экспонирования.

Список источников

- [1] **М. А. Брук** Formation of micro- and nanostructures with well-rounded profile by new e-beam lithography principle / Bruk M. A., Zhikharev E. N., Rogozhin A. E., Streltsov D. R., Kalnov V. A., Averkin S. N., Spirin A. V. // Microelectronic engineering. – 2016. – V. 155. – P. 92-96.
- [2] **Ф. А. Сидоров** Моделирование процесса формирования микро-оптических структур методом термостимулированной электронно-лучевой литографии / Ф. А. Сидоров, А. Е. Рогожин // Сборник трудов по материалам VIII Международной конференции и молодежной школы (г. Самара, 23-27 мая). – 2022. – Т. 1.

Sinusoidal holographic grating fabrication by dry e-beam etching of resist

F. A. Sidorov, A. E. Rogozhin

Valiev Institute of Physics and Technology of RAS, Moscow, Russia

Dry e-beam etching of resist (DEBER) is a microfabrication technique based on thermal depolymerization of positive polymer resist during e-beam exposure at temperatures above glass transition, which provides direct profile formation right at the exposure stage. DEBER features include high-throughput formation of wave-like profile by resist exposure in parallel lines. DEBER simulation showed that appropriate exposure parameters allow one to obtain sinusoidal gratings in PMMA with number of lines per mm up to 2000 and profile depth up to 200 nm. The standard deviation of grating profile from sine function at the same time is below 5%.

Keywords: Thermal depolymerization of resist, Dry e-beam etching of resist, Holographic sinusoidal gratings.

Усовершенствование способа формообразования неклассических нарезных дифракционных решёток на основе применения делительной машины маятникового типа

А. Н. Мельников

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе предложено техническое решение по усовершенствованию способа формообразования неклассических нарезных дифракционных решёток на основе применения делительной машины маятникового типа с учётом модификации принципов её построения. Приведены аналитические выражения, описывающие закономерности изменений основных геометрических параметров криволинейных проекций штрихов этих решёток.

Ключевые слова: Нарезная дифракционная решётка, Неклассическая дифракционная решётка, Сферическая дифракционная решётка, Способ формообразования, Усовершенствование, Делительная машина маятникового типа, Геометрические параметры штриха.

Цитирование: Мельников, А. Н. Усовершенствование способа формообразования неклассических нарезных дифракционных решёток на основе применения делительной машины маятникового типа / А. Н. Мельников // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 363–370.

Актуальность

Известно [1–3], что эффективная компенсация астигматизма в оптических схемах спектральных приборов достигается не только за счёт применения в них дифракционных решёток (ДР) на вогнутых асферических поверхностях, но и за счёт формирования системы криволинейных проекций штрихов (КПШ) сферических и тороидальных ДР (СДР и ТДР). Показано, что в рамках технических решений на основе использования делительных машин маятникового типа (ДММТ) [4–9] в плоскости, касательной к вершине СДР (или ТДР), образуется система КПШ, радиусы кривизны ближайших вершинных окружностей которых обратно пропорциональны заданной координате, что ведёт к снижению возможностей по компенсации aberrаций. Решение задачи по расширению практических возможностей компенсации aberrаций спектральных приборов является актуальной.

Исходные принципы построения делительных машин маятникового типа

Обратимся к исходным принципам построения ДММТ [4–7]:

- резцовая каретка (РК) выполнена в виде маятника, на котором закреплен механизм подъёма и опускания алмазного резца (АР);
- геометрические оси опор вращения РК и делительной каретки (ДК) ортогональны между собой и пересекаются в пространстве;

– РК и ДК предполагают в своём составе наличие телескопических механизмов, что позволит проводить необходимую настройку и обеспечить такую траекторию движения АР, которая бы практически повторяла радиус кривизны рабочей поверхности подложки дифракционной решётки;

– при изготовлении дифракционных структур на выпуклых подложках АР расположен выше оси вращения РК, а сама подложка – выше оси вращения ДК;

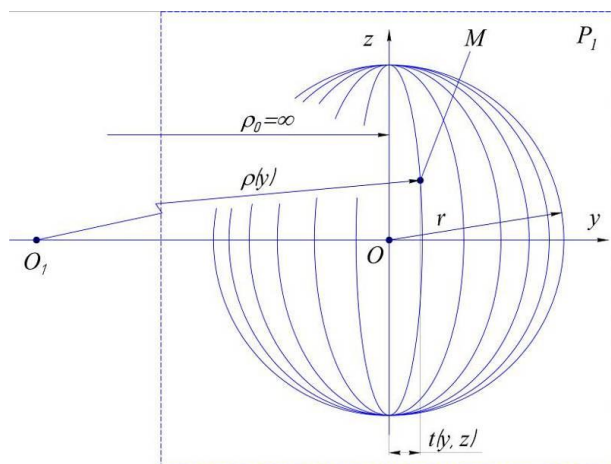
– привод перемещения ДК выполнен с возможностью обеспечения поворота ДК относительно её оси вращения и оснащён соответствующим датчиком поворота;

– привод перемещения РК выполнен с возможностью обеспечения угловых автоколебаний РК относительно её оси вращения;

– блок управления синхронизирует работу всех приводов и механизма подъёма и опускания АР;

– центр масс РК расположен ниже оси её вращения в целях обеспечения устойчивости её динамики в процессе формообразования штрихов.

Как следует из приведённого ранее описания работы ДММТ [4–7], для наиболее общего случая, когда подложка СДР представляет собой выпуклую полусферу радиусом кривизны r , система КПШ на плоскость P_1 , касательную к вершине этой решётки, соответствует рис.1.



т. O – центр кривизны подложки СДР в виде полусферы радиусом кривизны r , т. M – произвольная точка в пределах рассматриваемой КПШ, $\rho(y)$ – радиус кривизны ближайшей вершинной окружности с центром в т. O_1 , с помощью которой аппроксимируется рассматриваемая КПШ эллиптической формы в т. M , ρ_0 – радиус кривизны ближайшей вершинной окружности КПШ, проходящей через вершину СДР, $t(y, z)$ – стрелка прогиба рассматриваемой КПШ в т. M

Рис. 1. К описанию КПШ СДР [7]

Соотношения для описания основных геометрических параметров КПШ СДР получены в [7] и представлены в виде формул (1) – (3). Описание изменения формы КПШ в виде эллипсов в системе координат Oyz

$$\frac{y^2}{r^2 \sin^2 \varphi_i} + \frac{z^2}{r^2} = 1, \quad (1)$$

где φ_i – текущий угол сечения полусферы плоскостью (проходящей через центр полусферы), в которой перемещается АР для нанесения текущего штриха на сферической поверхности решётки.

Описание изменения радиуса кривизны ближайшей вершинной окружности, с помощью которой аппроксимируется КПШ эллиптической формы в произвольной т. М, как функции зависимости от изменения координаты у

$$\rho(y) = r^2/y. \quad (2)$$

Описание изменения переменного шага КПШ как функции зависимости от изменения координаты у

$$e \cong e_0(1 - 0,5r^{-2}y^2), \quad (3)$$

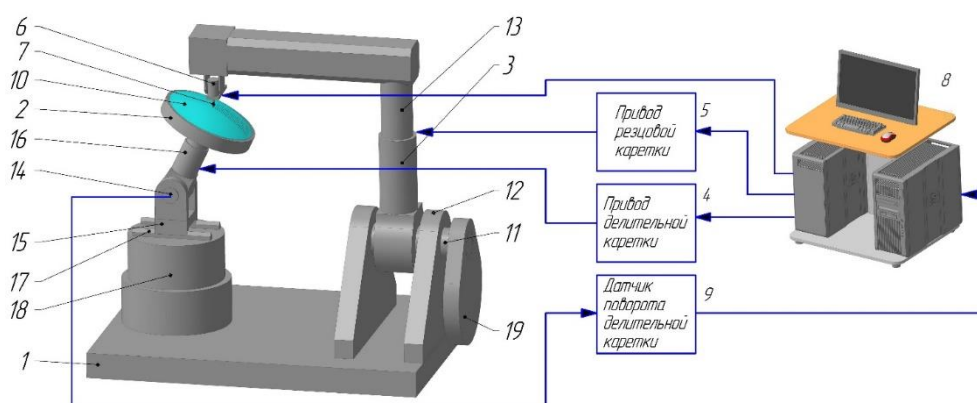
где e_0 — значение первого периода в принятой системе КПШ, равное значению постоянного линейного шага штриховой структуры, наносимой на поверхности подложки СДР.

Предлагаемое техническое решение

В целях расширения возможностей компенсации aberrаций СДР и ТДР за счёт формообразования системы КПШ с кривизной одного знака их ближайших вершинных окружностей с учётом того, что кривизна ближайшей вершинной окружности проекции центрального штриха не равна ∞ , предлагается использовать ДММТ [4], модифицируя основные принципы её построения и функционирования:

- а) должно быть обеспечено перекрещивание между собой осей поворота РК и ДК;
- б) конструкция ДК должна содержать механизм перемещения и фиксации оси поворота ДК (в горизонтальной плоскости) для смещения этой оси на заданное расстояние от плоскости, в которой перемещается АР при нарезке штрихов;
- в) конструктивные параметры РК по высоте должны быть больше радиуса кривизны СДР (или радиуса кривизны ТДР в меридиональном сечении).

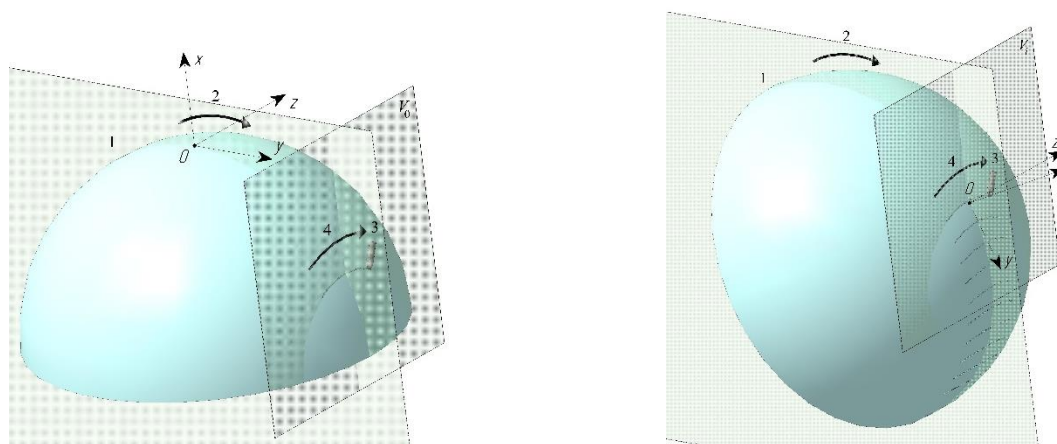
Один из возможных вариантов реализации предложенной модификации ДММТ представлен на рис. 2 в виде упрощённой блок-схемы.



1 — станина, 2 — ДК, 3 — РК, 4 — привод ДК, 5 — привод РК, 6 — механизм подъёма и опускания АР, 7 — АР, 8 — блок управления исполнительными устройствами, 9 — датчик поворота ДК, 10 — подложка изготавливаемой ДР, 11 — ось РК, 12 — опоры вращения РК, 13 — телескопический механизм РК, 14 — ось ДК, 15 — опоры вращения ДК, 16 — телескопический механизм ДК, 17 — направляющие линейного перемещения ДК для настроечно-юстировочных работ, 18 — механизм вертикальных линейных подвижек направляющих 17 для настроечно-юстировочных работ, 19 — противовес РК

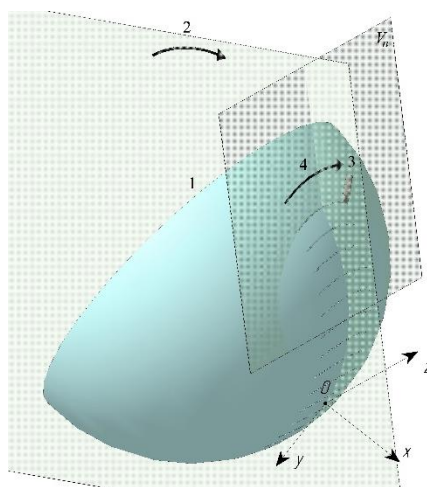
Рис. 2. Упрощённая блок-схема модифицированной ДММТ для изготовления неклассических нарезных СДР и ТДР

Использование предложенного модифицированного варианта построения и функционирования ДММТ приведёт к изменению получаемой общей картины формируемых штрихов на рабочей поверхности подложки СДР (ТДР) и, как следствие, к изменению общей картины КПШ в плоскости P_1 , касательной к вершине подложки, в сравнении с рис. 1. На рис. 3 представлены примеры формообразования штрихов для трёх сечений для наиболее общего случая выпуклой СДР, подложка которой имеет форму полусферы с радиусом кривизны r .



а) формообразование «нулевого» штриха в плоскости V_0 движения АР

б) формообразование i -го штриха в плоскости V_i движения АР



в) формообразование n -го штриха в плоскости V_n движения АР

1 — подложка СДР, 2 — траектория поворота подложки СДР относительно центра её кривизны,
3 — АР, 4 — траектория движения АР

Рис. 3. Примеры формообразования штрихов для трёх сечений на поверхности выпуклой СДР (при этом плоскости V_0 , V_i и V_n геометрически полностью между собой совпадают)

Вывод аналитических зависимостей

В целях получения математического описания коэффициентов aberrаций и в дальнейшем их оптимизации необходимо сначала вывести аналитические выражения, характеризующие основные геометрические параметры КПШ на примере изготовления СДР, которые могут быть сформированы с помощью предложенного модифицированного варианта построения и функционирования ДММТ и могут рассматриваться как спроецированные на плоскости P_1 , касательной к вершине подложки СДР, а именно:

- уравнение криволинейных проекций штрихов и закономерность его изменения;
- радиус кривизны ближайшей вершинной окружности, аппроксимирующей КПШ, и закон его изменения;
- закон изменения шага КПШ.

Уравнение криволинейных проекций штрихов. Запишем уравнение прямой, выражаемое в виде

$$y \cos \alpha_i + x \sin \alpha_i - R_V = 0, \quad (4)$$

где R_V и α_i – текущие полярные координаты (в плоскости Oxy), используемые для описания положения рассматриваемой плоскости сечения, в которой сформирован текущий штрих.

Запишем систему уравнений

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r^2, \\ y \cos \alpha_i + x \sin \alpha_i - R_V = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Из системы уравнений (5) исключим координату x , следовательно, получаем уравнение КПШ на плоскости Oyz (касательной к вершине выпуклой СДР), что эквивалентно исходной задаче

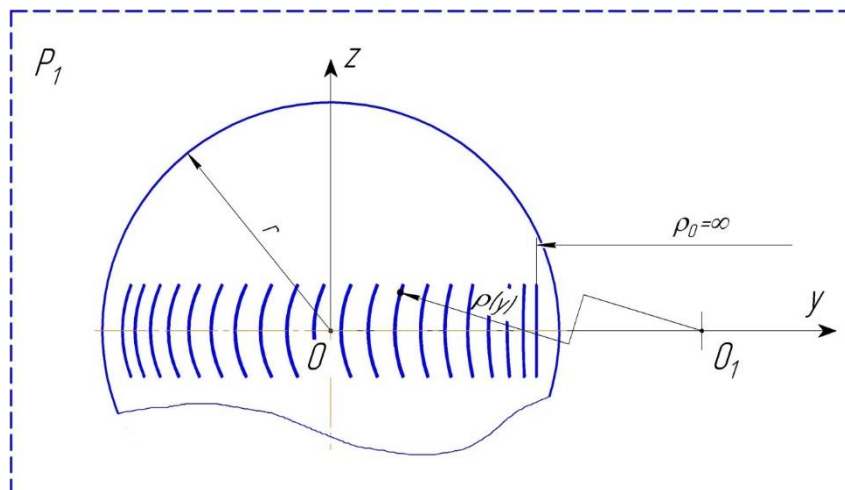
$$\left(\left(\frac{R_V}{\sin \alpha_i} \right) - \left(\frac{y \cos \alpha_i}{\sin \alpha_i} \right) \right)^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad (6)$$

Из выражения (6) нетрудно получить уравнение кривой 2-го порядка

$$\frac{(y - R_V \cos \alpha_i)^2}{(r^2 - R_V^2) \sin^2 \alpha_i} + \frac{z^2}{(r^2 - R_V^2)} = 1, \quad (7)$$

где r – радиус кривизны СДР (причём $R_V < r$).

Из уравнения (7) следует, что КПШ на плоскость Oyz имеют вид эллипсов (см. рис. 4).



O – центр кривизны подложки СДР в виде полусферы радиусом кривизны r , $\rho(y)$ – радиус кривизны ближайшей вершинной окружности с центром в O_1 , с помощью которой аппроксимируется рассматриваемая КПШ эллиптической формы для заданной точки, ρ_0 – радиус кривизны ближайшей вершинной окружности для начальной КПШ

Рис. 4. СДР с картиной КПШ (вид на плоскость P_1)

Радиус кривизны ближайшей вершинной окружности. Выведем математическое выражение, описывающее изменение радиуса кривизны полученной картины КПШ в зависимости от координаты y на основе так называемого радиуса кривизны ближайшей вершинной окружности $\rho(y)$.

В соответствии с [10] любой эллипс можно аппроксимировать ближайшей вершинной окружностью с радиусом кривизны

$$\rho = b^2/a. \quad (8)$$

В рассматриваемом случае $b = \sqrt{r^2 - R_V^2}$, $a = (\sqrt{r^2 - R_V^2}) \sin \alpha_i$.

Поскольку $\sin \alpha_i$ нетрудно представить в виде функции $f(y_i)$, то искомый радиус кривизны ближайшей вершинной окружности $\rho_i(y_i)$ можно получить из выражения (8) в следующем виде

$$\rho_i(y_i) = \rho_0 - py_i - qy_i^2 - sy_i^3 - ty_i^4, \quad (9)$$

где $\rho_0 = r \left(\sqrt{r^2 - R_V^2} \right) / R_V$, $p = (R_V^2 - r^2) / R_V^2$, $q = \left(\sqrt{r^2 - R_V^2} \right) (R_V^2 - 2r^2) / 2rR_V^3$, $s = (R_V^2 - r^2) / R_V^4$, $t = \left(\sqrt{r^2 - R_V^2} \right) (4r^2R_V^2 + R_V^4 - 8r^4) / 8r^3R_V^5$.

Закон изменения шага. Для получаемой картины КПШ СДР определим закономерность изменения шага, равного расстоянию между проекциями соседних штрихов, рассматриваемыми на плоскости P_1 , касательной к поверхности СДР в её центре. Поскольку шаг e_{pri} есть кратчайшее расстояние между ближайшими соседними КПШ вдоль оси Oy (при этом $z = 0$), то запишем

$$e_{pri+1} = y_{i+1} - y_i. \quad (10)$$

Используя алгоритм, аналогичный применённому в [7, 9], с учётом выведенного выражения (7), после выполнения ряда преобразований, получим конечное математическое выражение для описания переменного шага e_{pri} КПШ СДР в виде, удобном для выполнения моделирования коэффициентов аберраций,

$$e_{pri}(y_i) \cong e_0(1 - 0,5r^{-2}y_i^2 - 0,125r^{-4}y_i^4), \quad (11)$$

где e_0 – значение периода штрихов в вершине выпуклой СДР.

Выводы

1. Представленные нами ранее технические решения в области технологии изготовления неклассических нарезных СДР и ТДР на основе использования ДММТ имеют ограничения в части обеспечения возможностей по компенсации аберраций оптических схем спектральных приборов.

2. Предлагается решить эту актуальную проблему по расширению компенсационных возможностей неклассических нарезных решёток за счёт введения ряда усовершенствований в принципы построения и функционирования ДММТ и, соответственно, модернизации способа нанесения штриховой структуры этих решёток.

3. На примере выпуклых неклассических нарезных СДР, для которых учитываются особенности предложенного усовершенствованного способа формообразования их штриховых структур и изменения кинематики движения основных механизмов усовершенствованной ДММТ, представлен вывод математических выражений (7), (9) и (11) соответственно для описания формы КПШ, радиусов кривизны их ближайших вершинных окружностей и переменного шага, что открывает путь для расширения практических возможностей по компенсации aberrаций оптических систем спектральных приборов согласно известным методикам [2, 3]. Для реализации серийного производства вогнутых СДР-реплик необходимо применять прецизионное реплицирование на основе полимерных композиций холодного отверждения [10–12].

Список источников

- [1] **Пейсахсон, И. В.** Оптика спектральных приборов / И. В. Пейсахсон. — Л.: Машиностроение, 1975. — 312 с.
- [2] **Бажанов, Ю. В.** Фокусирующие дифракционные решётки и их aberrационные свойства. Приборы на их основе / Ю. В. Бажанов // Автореф. дис. ... доктора технических наук: 01.04.05 / Гос. оптич. ин-т. — Казань, 2004. — 34 с.
- [3] **Павлычева, Н. К.** Дифракционные решетки для спектральных приборов. Обзор / Н. К. Павлычева // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 3. — С. 28–41. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-03-28-41
- [4] **Патент на изобретение № 2691821 РФ.** Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на неплоских рабочих поверхностях / А. В. Лукин, А. Н. Мельников. — Заяв. 26.02.2018. — Оpubл. 18.06.2019.
- [5] **Мельников, А. Н.** Технологии формообразования светосильных дифракционных оптических элементов на основе использования делительной техники маятникового типа / А. Н. Мельников // Фотоника. — 2019. — Том 13. — № 5. — С. 468–475. — DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.5.468.475
- [6] **Патент на изобретение № 2725324 РФ.** Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на вогнутых поверхностях / А. Н. Мельников. — Заяв. 31.05.2019. — Оpubл. 02.07.2020.
- [7] **Бажанов, Ю. В.** Новые возможности получения неклассических нарезных дифракционных решеток большой апертуры / Ю. В. Бажанов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2021. — Том 88. — № 9. — С. 44–51. — DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-09-44-51
- [8] **Мельников, А. Н.** Новый подход в задаче формообразования тороидальных дифракционных решёток / А. Н. Мельников // XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сб. научн. трудов. — М.: НИЯУ МИФИ, 2022. — С. 181–182.
- [9] **Мельников, А. Н.** Новые принципы формирования штриховых структур светосильных неклассических нарезных тороидальных дифракционных решёток с применением делительных машин маятникового типа / А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 95–105. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-95-105
- [10] **Окатов, М. А.** Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов, Э. А. Антонов, А. Байгожин и др.; Под ред. М. А. Окатова. — СПб.: Политехника, 2004. — 679 с.

- [11] **Ахметов, М. М.** Научно-производственный комплекс серийной прецизионной репликации элементов асферической и дифракционной оптики / М. М. Ахметов, А. Ф. Белозёров, В. А. Балоев, А. А. Белокопытов, И. С. Гайнутдинов, В. П. Иванов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, И. А. Могилюк // Контенант. — 2016. — Том 15. — № 3. — С. 39–42.
- [12] **Лукин, А. В.** Прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей – научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 42–50. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-42-50

Improving the shaping method of non-classical ruled diffraction gratings based on the use of a pendulum-type ruling engine

A. N. Melnikov

JSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

The report proposes a technical solution meant to improve the shaping method of non-classical ruled diffraction gratings based on the use of a pendulum-type ruling engine with a modification of its design principles. It lists the analytical expressions describing the modification patterns of the main geometric parameters of the curvilinear projections of the grooves on these gratings.

Keywords: Ruled diffraction grating, Non-classical diffraction grating, Spherical diffraction grating, Shaping method, Improving, Pendulum-type ruling engine, Geometric parameters of grooves.

Визуализация потенциала действия методом голографической микроскопии

Ю. Н. Захаров, В. В. Дуденкова

Гарвардский университет, Бостон, США

Для исследования возможности голографической регистрации изменений, связанных с сигнальной активностью в телах и отростках возбудимых клеток. Были зарегистрированы серии голограмм с временем экспонирования 0,2 мс, и временем между кадрами 0,62 мс в нативном состоянии клеточных культур и после аппликации хлорида калия, что стимулирует непрерывную генерацию потенциалов действия. Предложенный способ голографической регистрации, показал возможность детектирования и визуализации изменений, связанных с сигнальной активностью в телах и отростках возбудимых клеток.

Ключевые слова: Фазовая цифровая голографическая микроскопия, нейрология, потенциал действия.

Цитирование: Захаров, Ю. Н. Визуализация потенциала действия методом голографической микроскопии / Ю. Н. Захаров, В. В. Дуденкова // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 371–374.

Введение

В нервных волокнах сигналы передаются с помощью потенциалов действия, которые представляют собой быстрые изменения мембранного потенциала, быстро распространяющиеся вдоль мембраны нервного волокна [1]. Потенциал действия (ПД) является физиологической основой нервного импульса. Движущееся по нервам возбуждение представляет собой нервные импульсы, а не потенциалы действия. Но в физиологической литературе в качестве синонима для нервного импульса принято использовать также и термин "потенциал действия", хотя потенциал действия — это только электрический компонент нервного импульса, характеризующий изменения электрического заряда (потенциала) на локальном участке мембраны во время прохождения через него нервного импульса. Нервный импульс - это сложный структурно-электро-химический процесс, распространяющийся по мембране нейрона в виде бегущей волны изменений в состоянии мембраны. Она включает в себя структурные изменения (открытие и закрытие мембранных ионных каналов), химические (изменяющиеся трансмембранные потоки ионов) и электрические (изменения электрического потенциала мембраны: деполяризацию, позитивную поляризацию и реполяризацию). На данный момент, потенциалы действия регистрируются с помощью микроэлектродов вводимых в клетку, поэтому такие методы, с одной стороны, не могут считаться неинвазивными, с другой – способны регистрировать ПД лишь в весьма ограниченном количестве точек, что не позволяет использовать их для наблюдения распространения сигналов по сети нейронов. Для исследования возможности голографической регистрации изменений, связанных с сигнальной активностью в телах и

отростках возбудимых клеток, были использованы первичные культуры нейрональных клеток гиппокампа мышей на пятнадцатом и двадцать втором дне культивирования в нейробазальной среде.

1. Условия регистрации и оборудование

Генерация и распространение потенциалов действия происходит за время порядка единиц миллисекунд, что требует для голографической записи этих процессов регистрирующих камер со временем экспозиции не более 1 мс и частотой кадров порядка килогерц.

Цифровая внеосевая голографическая установка была построена на базе прямого конфокального лазерного сканирующего микроскопа и оснащена скоростной КМОП камерой [2].

2. Результаты

Были зарегистрированы серии голограмм (Рис. 1) из 200 кадров с временем экспонирования 0,2 мс, и временем между кадрами 0,62 мс в нативном состоянии клеточных культур и после аппликации хлорида калия до концентрации в нейробазальной среде 60 mM, что стимулирует непрерывную генерацию потенциалов действия.

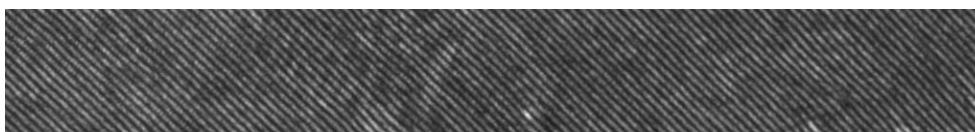


Рис. 1. Пример регистрируемой на CMOS камеру голограммы нейрональной клетки с отростком

В нативном состоянии ни на одной из 25 голограмм, записанных в произвольные моменты времени, не оказались зарегистрированными достаточные изменения, коррелирующие по своим временным параметрам с нервными импульсами. Это говорит о том, что в таком состоянии генерация ПД происходит достаточно редко.

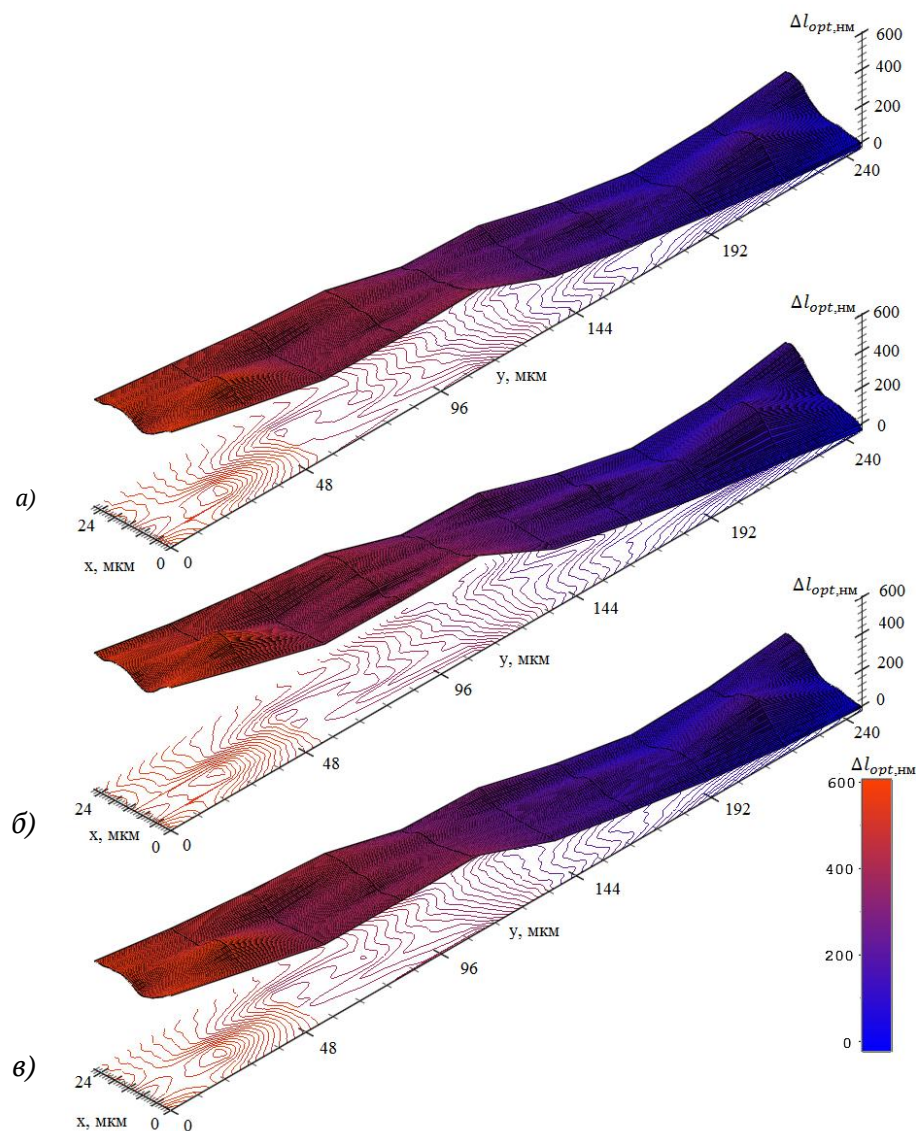


Рис. 2. Восстановленные фазовые портреты клетки с отростком:

а – начало измерений, б - 40-я мс записи, в- 124-я мс записи.

Здесь x, y – пространственные координаты в микрометрах, Δl_{opt} – в нанометрах

На фазовых портретах (Рис. 2), восстановленных с голограмм клеток с отростками после действия КС1, наблюдались изменения ОДП сигнальной волны на участках аксонов. Увеличение ОДП на 20 нм за время 1,5 – 2 мс 2 – 3 раза в течение временных серий длительностью 124 мс сопоставимо с временными характеристиками КС1-стимулированных потенциалов действия, проводимых аксонами гиппокампа мозга мышей. В одной из культур на двадцать втором дне культивирования в нейробазальной среде через полчаса после аппликации КС1 было зафиксировано резкое увеличение ОДП в аксоне примерно в 6 раз. После скачкообразного появления сигнала, величина амплитуды плавно снижалась в течение 100 мс. После чего ОДП приблизилась к первоначальным значениям.

Заключение

Таким образом, предложенный способ голографической регистрации, показал возможность детектирования и визуализации изменений, связанных с сигнальной активностью в телах и отростках возбудимых клеток, на примере действия KCl на первичные культуры нейрональных клеток гиппокампа мышей.

Благодарность

Авторы благодарны сотрудникам Центральной научно-исследовательской лаборатории Приволжского исследовательского медицинского университета, предоставившим образцы.

Список источников

- [1] **Barnett, M. W.** The action potential /M. W. Barnett, P. M. Larkman // Practical Neurology — 2007. — V. 7. — P. 192-197.
- [2] **Дуденкова, В. В.** Совершенствование многоканальных систем оптической микроскопии при использовании цифровой голографии / В. В. Дуденкова, М. С. Муравьева, А. И. Рыбников // Сборник трудов 10-й Международной конференции «ГолоЭкспо–2013» Голография. Наука и практика. — Москва, 2013 — С. 222.

Action potential detection by holographic microscopy

Yu. N. Zakharov, V. V. Dudenkova

Harvard University, Boston, USA

To study the possibility of holographic recording of changes associated with signaling activity in the bodies and processes of excitable cells, primary cultures of neuronal cells were used. A series of holograms were recorded with an exposure time of 0.2 ms, and framerates of 1600 fps in the native state of cell cultures and after the application of potassium chloride, which stimulates the continuous generation of action potentials. The proposed method of holographic registration showed the possibility of detecting and visualizing changes associated with signaling activity in the bodies and processes of excitable cells.

Keywords: Digital holographic microscopy, Neuroscience, Action potential.

Идентификация эрмит-гауссовых и бесселевых мод терагерцового пучка с помощью дифракционных оптических элементов

Н. Д. Осинцева^{1*}, В. В. Герасимов^{1,2}, Ю. Ю. Чопорова¹, В. Д. Кукотенко¹, В. С. Павельев^{3,4},
Б. А. Князев⁵

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Самарский университет, Самара, Россия

⁴ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

⁵ Без аффилиции

Развитие беспроводных телекоммуникационных систем требует дальнейшего повышения скорости передачи информации. Данная задача может быть достигнута переходом в терагерцовый диапазон спектра. Управление модовым составом терагерцовых бесселевых пучков позволит повысить плотность каналов передачи данных за счет модового мультиплексирования, а также обеспечит устойчивость передачи информации, благодаря свойствам «бездифракционности» и «самовосстановления». В данной работе экспериментально продемонстрирована возможность идентификации мод Эрмит-Гаусса (0,1 и 1,0) и Бесселя (топологический заряд $l=\pm 1\dots\pm 4$) в терагерцовом диапазоне с помощью бинарных дифракционных оптических элементов. Приведены результаты для одно- и многомодовых пучков ($l=-1$ и -2). Модовая идентификация также продемонстрирована для бесселевых пучков, искаженных фазовой неоднородной средой. Показана обратная трансформация бесселева пучка в квази-гауссову плоскую волну.

Ключевые слова: ТГц-диапазон, Дифракционные оптические элементы, Фазовый аксикон, Бесселевы пучки, Эрмит-гауссовы пучки, Оптические вихри.

Цитирование: Осинцева, Н. Д. Идентификация эрмит-гауссовых и бесселевых мод терагерцового пучка с помощью дифракционных оптических элементов / Н. Д. Осинцева, В. В. Герасимов, Ю. Ю. Чопорова, В. Д. Кукотенко, В. С. Павельев, Б. А. Князев // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 375–379.

Введение

Пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ) [1,2], или оптические вихри, играют большую роль в современной оптике в различных приложениях [3,4]. Наиболее перспективным и развивающимся на данный момент является применение таких волн в телекоммуникационных системах. Поверхность волнового фронта оптических вихрей представляет собой один или несколько геликоидов, вращающихся вокруг направления распространения, число которых называется топологическим зарядом l и может принимать значения от ± 1 (где + или – это направление вращения геликоида) вплоть до нескольких сотен. Наличие ОУМ дает возможность передавать несколько пучков на одной частоте независимо друг от друга – мультиплексирование каналов данных [5].

В связи с малой изученностью терагерцового (ТГц) диапазона, методы формирования оптических вихрей в данной области спектра не так хорошо развиты по сравнению, например, с видимым диапазоном, где основным методом является использование жидкокристаллических пространственных модуляторов света [6]. Однако, их применение невозможно, если речь идет о формировании пучков с ОУМ с помощью высокомощного ТГц излучения гиротронов [7,8] или лазеров на свободных электронах [9,10]. В таком случае подходящим способом является использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ). В наших предыдущих работах было показано изготовление и применение различных ДОЭ для управления поперечно-модовым составом мощного ТГц излучения Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) [11,12], в том числе для формирования бесселевых пучков с ОУМ [13].

Применение модовой мультиплексации требует решения и обратной задачи – декодирования. Необходимо знать модовый состав переданного пучка для расшифровки сигнала [3]. В данной работе был предложен и экспериментально апробирован метод идентификации мод Эрмита-Гаусса и Бесселя с помощью кремниевых бинарных ДОЭ.

1. Используемые методы и подходы

Поперечное распределение интенсивности пучка с ОУМ представляет собой набор концентрических колец и не несет информации о величине и знаке топологического заряда l . Метод идентификации модового состава пучка, предложенный в работе основан на фильтрации пространственного распределения поля с помощью системы из ДОЭ, аналогичного формирующему элементу, и линзы (рис. 1 а).

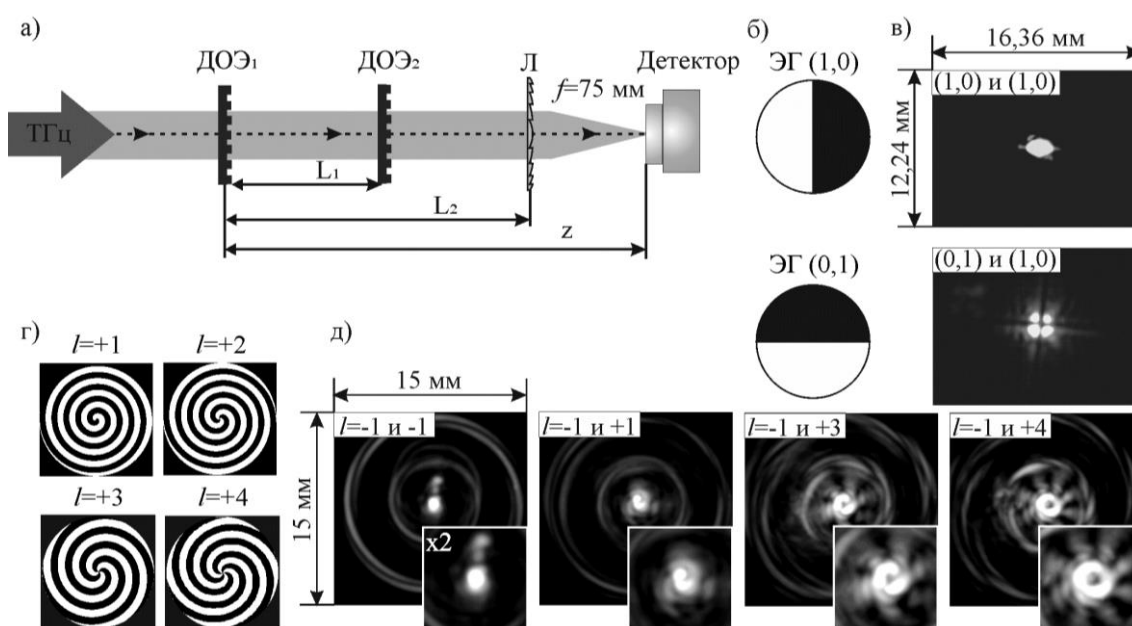


Рис. 1. (а) Схема для идентификации моды в случае одномодового пучка с помощью бинарных ДОЭ; фазовые маски ДОЭ для формирования эрмит-гауссовых (б) и бесселевых пучков с $l=+1, \dots, +4$, где черный цвет – 0, белый – π ; экспериментальные результаты идентификации мод Эрмит-Гаусса (в) и Бесселя (д).

В качестве ДОЭ в работе использовались два типа элементов: модан, для формирования и идентификации Эрмит-Гауссовых мод и аксикон, трансформирующий Гауссов пучок НЛСЭ в бесселев. ДОЭ представляют собой кремниевые пластинки с бинарным рельефом, обеспечивающим фазовый сдвиг волнового фронта на π (рис. 1 б, г).

2. Результаты

В работе показаны результаты идентификации мод Эрмит-Гаусса (1,0) и (0,1) и Бесселя с топологическими зарядами $|l|=1, \dots, 4$ (рис. 1 в и д), полученных в результате преобразования ТГц гауссова пучка НЛСЭ. В фокальной плоскости линзы в случае совпадения формирующего и фильтрующего ДОЭ, наблюдается так называемый положительный отклик, который представляет собой пятно с пиком интенсивности в центре, в обратном же случае, картина отличается и состоит из набора пятен вокруг центра с минимумом интенсивности. Важно отметить, что в случае бесселевого пучка, образованного бинарным аксиконом, наблюдаются особенности, позволяющие получить больше информации об идентификации. Дуги, образующие кольца вокруг центрального пика и являющиеся фурье-образом бесселева пучка, становятся неразличимы при отрицательном отклике и различимы при положительном, чего не наблюдается в случае более простой моды Эрмита-Гаусса.

Экспериментально продемонстрирована идентификация бесселевой моды в пучке с комбинацией топологических зарядов -1 и -2 как в свободном пространстве, так и после прохождения фазово-неоднородного препятствия.

Заключение

Применение бинарных аксиконов, аналогичных используемым для формирования бесселевой моды, и линзы позволят идентифицировать модовый состав комбинированного ТГц пучка. Результаты идентификации, полученные в случае прохождения пучка через фазовое препятствие, демонстрируют возможность декодирования информационного сигнала в условиях неоднородности атмосферы, таких как смог, туман, осадки и т.д. Данный подход может быть применен для построения беспроводных систем квазиоптической связи.

Благодарность

В работе использовалось оборудование Центра коллективного пользования "Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения" на базе уникальной установки "Новосибирский ЛСЭ" в ИЯФ СО РАН.

Список источников

- [1] **Allen L.** Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, J. P. Woerdman // Physical review A. — 1992. — Vol 45. — № 1. — P. 8185.
- [2] **Shen Y.** Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen, X. Wang, Z. Xie et. al. // Light: Science & Applications. — 2019. — Vol 8. — № 1. — P. 90.

- [3] **Yang H.** Terahertz orbital angular momentum: Generation, detection and communication / H. Yang, S. Zheng, W. He et. al. // *China Communications*. — 2021. — Vol. 18. — №. 5. — P. 131-152.
- [4] **Khonina S. N.** Bessel Beam: Significance and Applications—A Progressive Review // S. N. Khonina, N. L. Kazanskiy, S. V. Karpeev, M. A. Butt // *Micromachines*. — 2020. — Vol. 11. — №. 11. — P. 997.
- [5] **Zhu L.** A review of multiple optical vortices generation: methods and applications / L. Zhu, J. Wang // *Frontiers of Optoelectronics*. — 2019. — Vol. 12. — P. 52-68.
- [6] **Guan S.** Recent progress of terahertz spatial light modulators: materials, principles and applications / S. Guan, J.Cheng, S. Chang // *Micromachines*. — 2022. — Vol. 13. — №. 10. — P. 1637.
- [7] **Glyavin M. Y.** Development and applications of THz gyrotrons / M. Y. Glyavin // *EPJ Web of Conferences*. — EDP Sciences. 2017. — Vol. 149. — P. 01008.
- [8] **Glyavin M. Y.** Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field / M. Y. Glyavin, A. G. Luchinin, G. Y. Golubiatnikov // *Physical review letters*. — 2008. — Vol. 100. — №. 1. — P. 015101.
- [9] **Tan P.** Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications / J. Huang, K. Liu, Y. Xiong, M. Fan // *Science China Information Sciences*. — 2012. — Vol. 55. — P. 1-15.
- [10] **Shevchenko O. A.** The Novosibirsk free electron laser facility / O. A. Shevchenko, N. A. Vinokurov, V. S. Arbutov et. al. // *SYNCHROTRON AND FREE ELECTRON LASER RADIATION: Generation and Application (SFR-2020) AIP Conference Proceedings*. — 2020. — Vol. 2299. — №. 1. — P. 020001. — DOI:10.1063/5.0031513
- [11] **Agafonov A. N.** Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation / A. N. Agafonov, B. O. Volodkin, A. K. Kaveev et. al. // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. — 2013. — Vol. 49. — P. 189-195.
- [12] **Pavelyev V.** Subwavelength Diffractive Optical Elements for Generation of Terahertz Coherent Beams with Pre-Given Polarization State / V. Pavelyev, S. Khonina, S. Degtyarev et. al. // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23. — №. 3. — P. 1579.
- [13] **Choporova Y. Y.** High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range / Yu. Yu. Choporova, B.A. Knyazev, G. N. Kulipanov et. al. // *Physical Review A*. — 2017. — Vol. 96. — №. 2. — P. 023846.

Hermite-Gaussian and Bessel mode identification of terahertz beam with diffractive optic elements

*N. D. Osintseva¹, V. V. Gerasimov^{1,2}, Yu. Yu. Choporova¹, V. D. Kukotenko¹, V. S. Pavelyev^{3,4},
B. A. Knyazev⁵*

¹ Budker Institute of Nuclear Physics of the SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³ Samara National Research University, Samara, Russia

⁴ Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the RAS, Samara, Russia

⁵ Without affiliation

The development of wireless telecommunication systems requires increasing data transmission rate. It can be accomplished by shifting up the carrier frequency to the terahertz range. Controlling the modal composition of directed terahertz beams allows increasing the density of transmitted data channels due to mode multiplexing. At the same time, using the Bessel modes ensures the transmission stability, thanks to the properties of "non-diffraction" and "self-healing" of such beams. This work presents the experimental results of Hermite-Gaussian (0,1 and 1,0) and Bessel (topological charge $l=\pm 1\dots\pm 4$) mode identification by beams of the binary diffractive optical elements in the terahertz range. Experiments were carried out for single-mode and combined beams ($l=-1$ and -2). Moreover, Bessel mode identification was demonstrated for the beams passed through an inhomogeneous medium. The back-conversion of the Bessel beam into a plane quasi-Gaussian beam in the far field was shown.

Keywords: THz range, diffractive optical elements, phase axicon, Bessel beams, Hermite-Gaussian beams, vortex beams.

Гиперспектральный индекс для обнаружения подкожных кровеносных сосудов

М. М. Хамза¹, Р. В. Скиданов^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

² Институт систем обработки изображений РАН—филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

Визуализация подкожных кровеносных сосудов невооруженным глазом очень сложна, но важна для диагностики заболеваний и различных медицинских процедур. Некорректное взятие крови может принести дискомфорт и болевые ощущения пациенту, чьи вены трудно увидеть медицинскому работнику. Чтобы смягчить эту проблему, создан метод визуализации кровеносных сосудов на основе использования двухволнового индексного изображения в спектральном диапазоне от 400 до 1000 нм для выделения кровеносных сосудов. В результате были получены гиперспектральные изображения и рассчитан индекс изображения по формуле, аналогичной формуле расчета индекса NDVI для усиления контрастности кровеносных сосудов под кожей. Таким образом, предложенный метод оказался полезным инструментом для визуализации подкожных кровеносных сосудов.

Ключевые слова: Кровеносные сосуды под кожей, Гиперспектрометр, Спектральный анализ, Гиперкуб, Расчета индекса.

Цитирование: Хамза, М. М. Гиперспектральный индекс для обнаружения подкожных кровеносных сосудов / М. М. Хамза, Р. В. Скиданов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 380–385.

Введение

Целью данного исследования является разработка недорогого мобильного медицинского решения для выделения подкожных кровеносных сосудов с использованием спектроскопии ближнего инфракрасного (NIR) спектра.

Венепункция – ежедневная процедура в медицинских учреждениях. Исследование показало, что около 90% госпитализированных пациентов может потребоваться периферическая канюляция, являющаяся необходимым условием для проведения различных лечебных, реанимационных и диагностических мероприятий. Особенно для периферических вен [1], включая внутривенные инъекции, забор и переливание венозной крови и др. Первичным условием для венепункции является возможность точно определить местонахождение вены, тем не менее, частота неудач относительно высока и осложняется особенно у пациентов с темным оттенком кожи, глубокими венами, пациентов с ожирением [2], или медицинским состоянием, называемым трудным периферическим внутривенным доступом (DIVA) [3].

Таким образом, у медицинского персонала нет другого выбора, кроме как действовать, основываясь на своих знаниях анатомии и личном опыте. Иногда это приводит к некоторым ошибкам, которые могут причинить прямой или косвенный вред пациенту [4].

Существует множество устройств, помогающих медицинскому персоналу лучше визуализировать невидимые вены пациентов. В этих устройствах используется один из следующих методов: просвечивающая, фотоакустическая, ультразвуковая и NIR - визуализация [5]. Все эти методы имеют разные преимущества и недостатки, но NIR – гиперспектрометр, использующий ближнюю инфракрасную область электромагнитного спектра от 740 до 760 нм, позволяет визуализировать кровеносные сосуды, расположенные на глубине 3–5 мм под кожей, и в настоящее время он представляет собой один из наиболее многообещающих подходов, направленных на повышение эффективности венопункции [6–8]. Последнее исследование показало, что спектральную дифракционную линзу можно применять для выделения кровеносных сосудов на коже [9].

Поэтому разработка системы визуализации кровеносных сосудов под кожей имеет важное значение для решения вышеуказанных проблем. В данной работе был предложен метод усиления контраста между кровеносными сосудами и окружающей тканью за счет расчета индекса (NDVI), без использования цифровой обработки изображения. Для получения высококонтрастных изображений сосудов под кожей чаще всего используют NIR - область спектра от 700 нм до 900 нм.

1. Материалы и методы

Система получения гиперспектральных изображений показана на рис. 1. В данной системе использовалась спектральная камера, получающая изображения в видимом, а также в ближнем ИК-диапазоне, то есть от 400 до 1000 нм, со спектральным разрешением 4,2 нм, что является шириной каждого канала захваченного спектра. Общее количество каналов составляет 250, что дает среднее расстояние 0,6 нм между каждой центральной длиной волны. Эта камера обеспечивает высокое пространственное и спектральное разрешение с регулируемым полем зрения для сканирования. Для освещения использовалась галогенная лампа мощностью 1500Вт, установленная на расстоянии около 120 см от предплечья как можно ближе к оптической оси экспериментальной установки. Камера установлена на расстоянии около 100 см от предплечья. Мы получили изображения области предплечья, так как нас интересуют подкожные кровеносные сосуды этой области.

Полное изображение сцены на каждой отдельной длине волны получается и сохраняется в виде куба. Этот гиперспектральный подход позволяет нам глубже изучить спектральную реакцию тканей кожи и кровеносных сосудов в зависимости от длины волны освещения. Программное обеспечение Basler использовалось для настройки параметров камеры и сбора данных. Время сканирования гиперспектрального изображения для одного объекта составляет около 40 с. Это зависит от выбранного диапазона сканирования камеры, используемой с датчиком. Нашей целевой областью была предплечье 35-летнего молодого

человека, поэтому выбран диапазон сканирования около 35° (который охватывает область от локтя до кончиков пальцев).

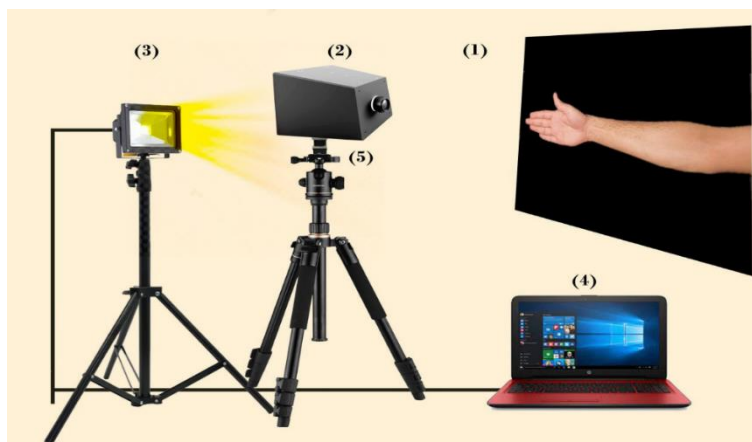


Рис. 1. Система гиперспектральной визуализации для сбора данных: 1) предплечье человека; 2) гиперспектрометр; 3) источник света; 4) компьютер с предварительной обработкой изображения; 5) импульсный двигатель, соединенный с камерой

Съемка производилась сканированием, путем установки гиперспектральной камеры на специальный съемочный штатив, оснащенный приводом углового вращения с возможностью регулировки скорости вращения. При записи изображений гиперспектрометром были получены спектральные 1000 изображений различных длин волн в диапазоне длин волн RGB от 400 до 1000 нм в формате JPG с разрешением 1020×1022 пикселей.

Затем из собранных данных получается «гиперкуб» или «модель изображения куба», показанная на рис. 2. Это трехмерный массив данных, включающий два пространственных измерения (компоненты изображения) и одно спектральное измерение.

Для сбора гиперкуба создан программный комплекс для обработки спектральных изображений, приняты математические алгоритмы для расчета спектральных индексов с помощью программного обеспечения (hyper & HSIT).

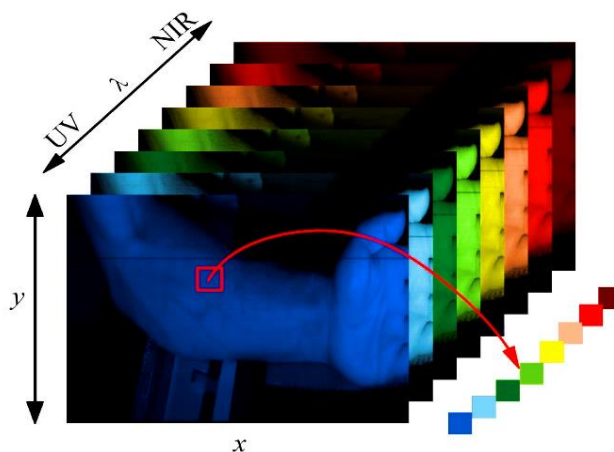


Рис. 2. Гиперспектральный куб, полученный с помощью установки для получения гиперспектральных изображений

На рис. 3 показана группа спектральных 2D каналов с разной длиной волны подкожных сосудов и окружающими тканями от 700 нм до 820 нм, но не высокой контрастности, полученных с помощью программы HSI. Для повышения контрастности необходимо рассчитать индекс, о котором будет сказано ниже.

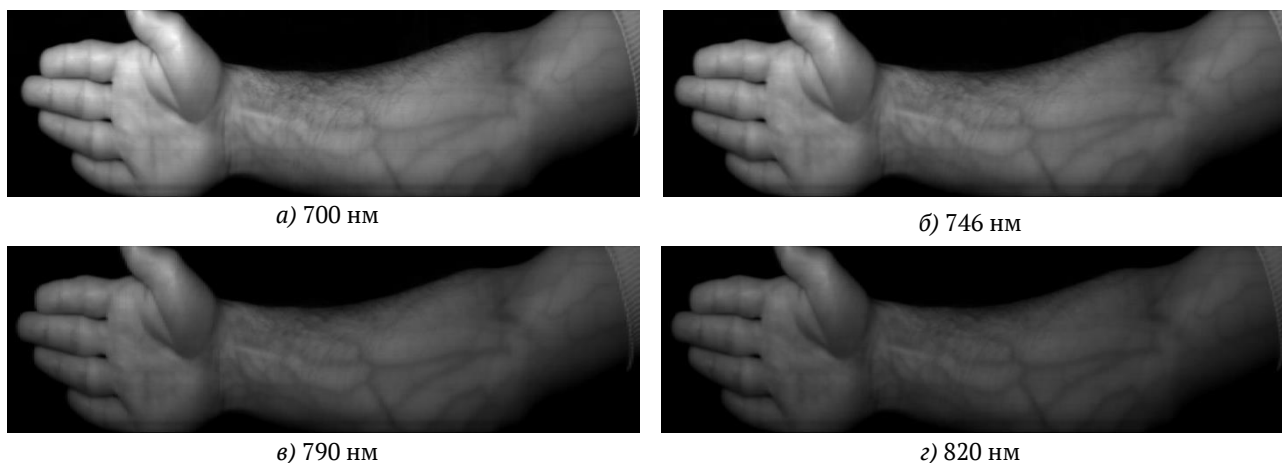


Рис. 3. Группа спектральных каналов с разной длиной волны

2. Метод расчета индекса

Значение сосудистого индекса можно рассчитать с помощью программы Нурер. Для этого вычислялось индексное изображение по формуле, похожей на формулу вычисления индекса NDVI:

$$R_{ij} = \frac{I_{\lambda_i} - I_{\lambda_j}}{I_{\lambda_i} + I_{\lambda_j}}, \quad (1)$$

где R_{ij} — индексное изображение, I_{λ_i} — изображение на длине волны λ_i , I_{λ_j} — изображение на длине волны λ_j

В данном исследовании из всех комбинаций спектральных каналов рассчитывается полномасштабное гиперспектральное изображение, а затем по полученному набору индексных изображений определяются длины волн, при использовании которых целевой объект наиболее четко отображается на индексном изображении. Этот метод довольно трудоемок, так как, например, при 250 спектральных каналах, получаемых гиперспектрометром, получается $250 \times 250 = 62250$ индексных изображений, и интенсивность света камеры чувствительна в диапазоне длин волн от 400 до 1000 нм, как показано на рис. 4. Контраст между подкожными кровеносными сосудами и окружающей тканью значительно увеличился.

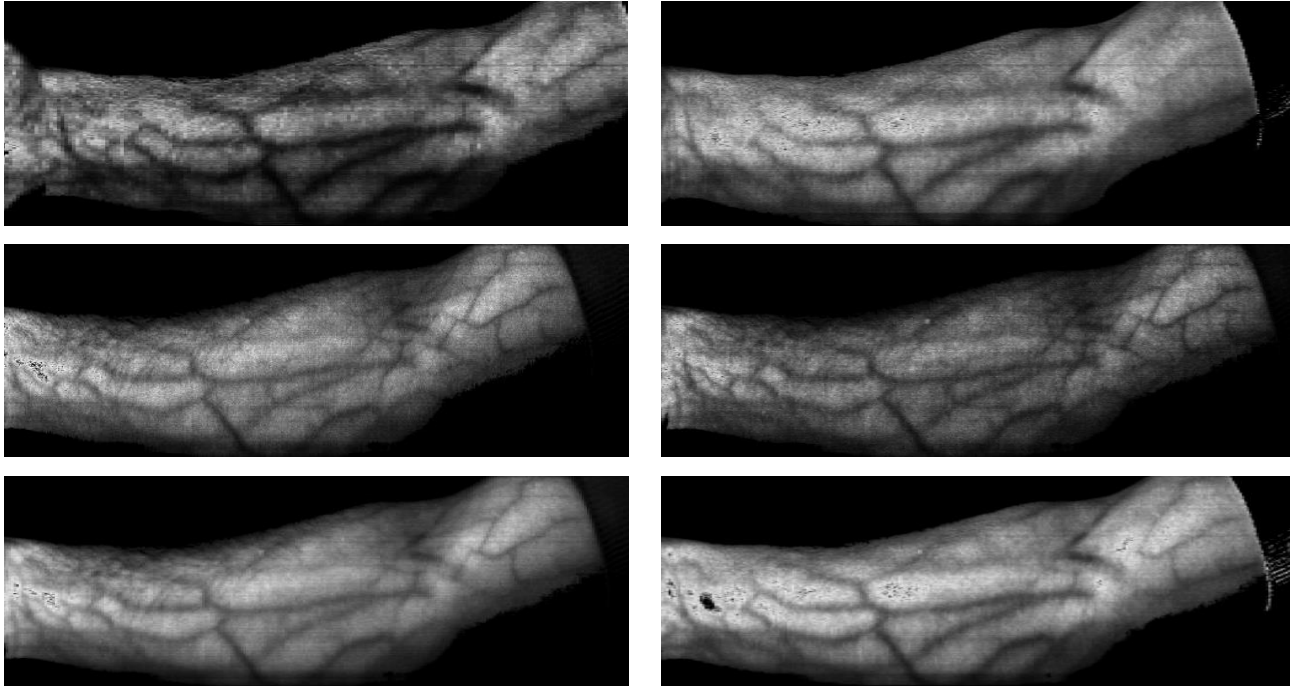


Рис. 4. Двухволновое индексное изображение для более контрастной видимости между кровеносными сосудами и окружающей тканью

Заключение

Гиперспектральная визуализация может одновременно получать двумерные изображения и информацию о спектральной области. Полученные двухволновые индексные изображения сосудов кожи человека имеют высокую контрастность, а при применении гиперспектрального индекса контраст между окружающей тканью и кровеносными сосудами значительно увеличивается. Результаты, полученные в этом исследовании с помощью гиперспектрометра, подтвердили свое важное исследовательское значение в биомедицине. Предложенный метод оказался эффективным, а также недорогим и простым в получении гиперспектральных изображений высокого разрешения.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-69-47110.

Список источников

- [1] **Lamperti, M.** Difficult peripheral veins: Turn on the lights / M. Lamperti, M. Pittiruti // Br. J. Anaesth. — 2013. — Vol. 110. — P. 888–891. — DOI:10.1093/bja/aet078.
- [2] **Abd Rahman, A. B.** Near Infrared Illumination Optimization for Vein Detection: Hardware and Software Approaches / A. B. Abd Rahman, F. Juhim, F. P. Chee, A. Bade, F. Kadir // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12. — № 21. — P. 11173. — DOI:10.3390/app122111173.
- [3] **Yen, K.** New Biomedical Devices That Use Near-Infrared Technology to Assist with Phlebotomy and Vascular Access / K. Yen, M. H. Gorelick // Pediatric Emergency Care. — 2013. — Vol. 29. — № 3. — P. 383 — 385. — DOI: 10.1097/PEC.0b013e31828680f9.

- [4] **Shahzad, A.** A review on subcutaneous veins localization using imaging techniques / A. Shahzad, M. Naufal Mohamad Saad, N. Walter, A. Saeed Malik, F. Meriaudeau // *Current Medical Imaging*. — 2014. — Vol. 10. — № 2. — P. 125-133.
- [5] **Mzoughi, M.** Blood vessel detection using hyperspectral imaging / M. Mzoughi, D. Thiem, Hornberger, C // *Current Directions in Biomedical Engineering*. — 2022. — Vol. 8. — № 2. — P. 715-718. — [DOI:10.1515/cdbme-2022-1182](https://doi.org/10.1515/cdbme-2022-1182).
- [6] **Katrašnik, J.** Contrast enhancement of subcutaneous blood vessel images by means of visible and near-infrared hyper-spectral imaging / J. Katrašnik, M. Bürmen, F. Pernuš, B. Likar // *SPIE Conference Proceeding*. — 2009. — Vol. 7259. — P. 737-745. — [DOI:10.1117/12.812438](https://doi.org/10.1117/12.812438).
- [7] **Goel, M.** HyperCam: hyperspectral imaging for ubiquitous computing applications / M. Goel, E. Whitmire, A. Mariakakis, T. S. Saponas, N. Joshi, D. Morris, B. Guenter, M. Gavriliu, G. Borrielo, S. N. Patel // *UBICOMP Conference Proceeding*. — 2015. — P. 145-156.
- [8] **Wang, F.** High-contrast subcutaneous vein detection and localization using multispectral imaging / F. Wang, A. Behrooz, M. Morris, A. Adibi // *Journal of biomedical optics*. — 2013. — Vol. 18. — № 5. — P. 050504-1–050504-3.
- [9] **Hamza, M. M.** Spectral lenses to highlight blood vessels in the skin / M. M. Hamza, V. A. Blank, V. V. Podlipnov, L. L. Doskolovich, R. V. Skidanov, B. Fan // *Computer Optics*. — 2022. — Vol. 46. — № 6. — P. 899-904.

Hyperspectral index for detecting subcutaneous blood vessels

M. M. Hamza¹, R. V. Skidanov^{1,2}

¹Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

²Image Processing Systems Institute of the RAS—Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Samara, Russia

Visualization of subcutaneous blood vessels with the naked eye is very difficult, but important for the diagnosis of diseases and various medical procedures. Incorrect blood sampling can bring discomfort and pain to a patient whose veins are difficult for a healthcare professional to see. To mitigate this problem, created a method for visualizing blood vessels based on the use of a two-wavelength index image in the spectral range from 400 to 1000 nm to highlight blood vessels. As a result, hyperspectral images were obtained and the image index was calculated using a formula similar to the formula for calculating the NDVI index for enhancing the contrast of blood vessels under the skin. Thus, the proposed method has proven to be a useful tool for imaging subcutaneous blood vessels.

Keywords: Blood vessels under the skin, Hyperspectrometer, Spectral analysis, Hypercube, Index calculation.

Анализ спектрального состава упругих волн в волноводе из полистирола на основе их цифровых голограмм

А. А. Жихорева, А. В. Белашов, Я. М. Бельтюков, И. В. Семенова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлен новый подход к анализу картин упругих волн в прозрачном материале, полученных методом цифровой голографии. Анализ спектральных составляющих продольных волн деформации был выполнен в нескольких областях волновода в процессе распространения исходной ударной волны по волноводу и ее эволюции в нелинейную уединенную волну деформации. Полученные данные позволили оценить затухание относительно коротковолновых и длинноволновых составляющих и продемонстрировать гораздо более быстрое затухание высокочастотных компонент по сравнению с длиной уединенной волной. Была проанализирована зависимость спектрального состава упругой волны от энергии исходной ударной волны и показано увеличение относительного вклада длинноволновых составляющих с ее ростом.

Ключевые слова: Цифровая голография, Нелинейная уединенная волна деформации, Спектральный состав.

Цитирование: Жихорева, А. А. Анализ спектрального состава упругих волн в волноводе из полистирола на основе их цифровых голограмм / А. А. Жихорева, А. В. Белашов, Я. М. Бельтюков, И. В. Семенова // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 386–389.

В нашей недавней работе [1] мы исследовали процесс трансформации ударной волны в нелинейную уединенную волну (солитон) деформации в стержне из нелинейно-упругого материала (полистирола). С помощью численного моделирования была исследована зависимость коэффициента затухания от частоты компонентов волны, и было показано, что высокочастотные компоненты затухают значительно быстрее низкочастотных, а также, что они в значительно меньшей степени подвержены влиянию нелинейных эффектов. В настоящей работе мы провели анализ спектрального состава экспериментально зарегистрированных волновых картин в процессе распространения ударной волны в бруске из полистирола.

Исходная ударная волна генерировалась в кювете с водой при взрывном лазерном испарении металлизированной пленки, помещенной вблизи входного торца бруска из полистирола. Взрывное испарение металлического слоя осуществлялось импульсным Nd:YAG лазером Spitlight 600 (Innolas, Германия) с длительностью импульса 7 нс и максимальной энергией в импульсе ~0,5 Дж на длине волны 532 нм. Ударная волна входила в волновод из прозрачного полистирола сечением 10×10 мм², длиной 600 мм. Регистрация волновых картин в волноводе осуществлялась методом внеосевой цифровой голографии с помощью быстродействующей камеры Nanogate 24 (Nanoscan, Россия) с экспозицией 100 нс. Синхронизация импульса лазера и затвора камеры осуществлялась генератором импульсов

AM300 Dual Arbitrary Generator (Rohde&Schwarz). Для записи голограмм использовался непрерывный лазер DPSS, излучающий на длине волны 532 нм. Размер поля зрения составлял 65 мм, регистрация волновых картин производилась в пяти последовательных областях волновода: (I) 0-50 мм, (II) 50-100 мм, (III) 100-150 мм, (IV) 150-200 мм и (V) 200-250 мм. Восстановление двух голограмм, соответствующих отсутствию и наличию упругой волны в поле зрения, позволяло рассчитать распределение интегрального по толщине волновода фазового набега, вызванного упругой волной. Восстановление голограмм проводилось с использованием least-square minimization algorithm [2].

Для анализа спектрального состава зарегистрированной упругой волны была использована следующая процедура численной обработки. На первом этапе была выполнена процедура восстановления голограммы и развертки фазы. Затем для каждого ряда полученного фазового распределения были взяты Фурье-преобразования и усреднены абсолютные значения, соответствующие всем анализируемым рядам. Поскольку нас интересовал спектральный состав продольных упругих волн, Фурье-преобразование рассчитывалось только вдоль оси X, соответствующей направлению распространения волны.

На рис. 1 (a, b) приведены типичные фазовые распределения (b) и определенные по ним профили упругих волн (a) в горизонтальных сечениях волновода, в трех последовательных областях бруска из полистирола. Для каждой области был рассчитан пространственный Фурье-спектр $F(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} (\varphi(x) - \langle \varphi \rangle) e^{i2\pi\mu x} dx$ в зависимости от пространственной частоты μ , где $\varphi(x)$ -- профиль фазового набега, вызванного продольной упругой волной и $\langle \varphi \rangle$ - средний фазовый набег. Поскольку нас интересовали относительные вклады спектральных компонент, был рассчитан нормализованный Фурье-спектр $\Phi(\mu) = |F(\mu)| / \int |F(\mu')| d\mu'$. Результаты, полученные для первых трех областей волновода, приведены на рис. 1 (c).

Как видно из рис. 1 (c), при распространении упругой волны по волноводу происходит постепенное перераспределение вкладов спектральных компонент. Как видно на вставках, по мере продвижения волны растет вклад компонент с меньшей частотой (более длинным периодом $T=1/\mu$) и уменьшается вклад компонент со средним периодом $\sim 10-15$ мм).

Из-за существенного уровня шума на полученных спектрах было проведено дополнительное усреднение по диапазонам пространственных частот μ :

$$\bar{\Phi}(\mu_0) = \frac{1}{\delta\mu} \int_{\mu_0 - \delta\mu/2}^{\mu_0 + \delta\mu/2} \Phi(\mu) d\mu.$$

Диапазоны частот, в которых проводилось усреднение, показаны на рис. 1(c) полупрозрачной подсветкой серо-голубого цвета. В результате усреднения были рассчитаны амплитуды, соответствующие пространственным периодам компонент $T_0 = 1/\mu_0 = 1, 2, 3.5, 5, 7, 10, 15, 50$ мм и соответствующие ширины полосы $\delta\mu = 0.3, 0.16, 0.12, 0.09, 0.07, 0.04, 0.035, 0.03$ мм⁻¹. Полученные графики значений $\bar{\Phi}(\mu_0)$ для пяти областей волновода приведены на рис. 1(d). Соответствующие фазовые распределения показаны на вставке.

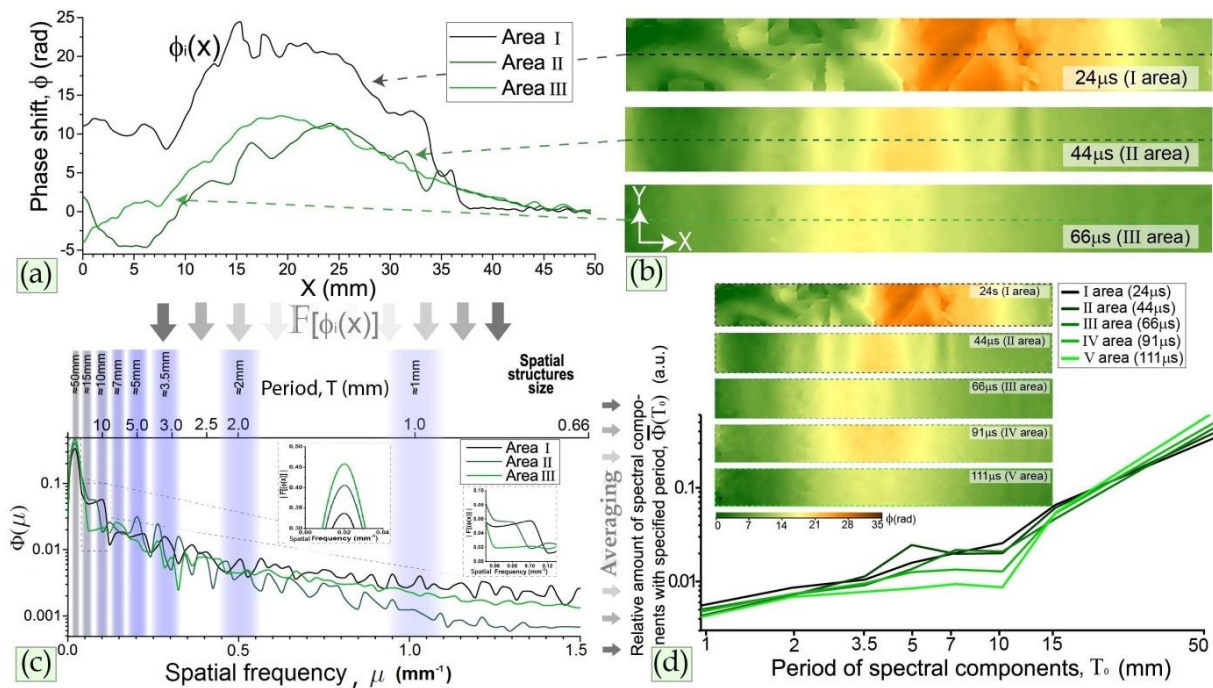


Рис. 1. (a) - профили упругой волны, полученные из фазовых распределений, зарегистрированных на I, II и III участках волновода; (b) - типичные фазовые распределения на этих участках; (c) - пространственный Фурье-спектр упругих волн на этих участках, увеличенные фрагменты, показывающие компоненты с низкой и средней частотой приведены на вставках. Диапазоны частот, из которых собирались данные для последующего анализа, показаны серо-голубым цветом. Площади под кривыми были нормализованы для облегчения сравнения спектров. (d) - усредненные относительные количества спектральных компонент в упругой волне на I-V участках волновода. Соответствующие фазовые распределения приведены на вставке.

Анализ данных на рис. 1(d) показывает, что в начале волновода в упругой волне преобладает вклад высокочастотных компонент. При распространении волны по волноводу вклад этих компонент уменьшается, в то время как вклад низкочастотных компонент увеличивается и становится преобладающим. Этот результат находится в хорошем согласии с нашими предыдущими исследованиями, основанными на численном моделировании эволюции ударной волны в нелинейно-упругом стержне [1], а также с нашими предыдущими экспериментами [3], которые позволили оценить коэффициенты затухания высокочастотных компонент как $\alpha \approx 0,25 \text{ мм}^{-1}$ и низкочастотных как $\alpha \approx 0,012 \text{ мм}^{-1}$. Такая значительная разница в коэффициентах затухания упругих волн разной частоты способствует формированию объемных нелинейных уединенных волн деформации в волноводах из полистирола.

На следующем этапе анализа изменений спектрального состава упругой волны были исследованы относительные вклады высоко- и низкочастотных компонент при разных энергиях исходной ударной волны. Изменение энергии ударной волны осуществлялось изменением энергии лазерного импульса. Было показано, что вклады коротко- и длинноволновых компонент упругой волны существенно различаются при разных энергиях исходной ударной волны. При низких энергиях наблюдаются значительные вариации

вкладов этих компонент, в то время как при бóльших энергиях относительные вклады этих компонент с изменением энергии не меняются. Эти наблюдения согласуются с нашими предыдущими данными о наличии некоторого порогового значения энергии ударной волны, необходимого для формирования уединенной волны деформации в волноводах из полистирола и ПММА.

Таким образом, мы показали, что проведенный нами анализ цифровых голограмм картин упругих волн в волноводе из полистирола позволил выделить спектральные компоненты упругой волны в ходе ее распространения по волноводу, определить их коэффициенты затухания, а также оценить энергию исходной ударной волны, необходимую для формирования из нее солитона деформации.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-72-10083).

Список источников

- [1] **Garbuzov, F.E.** Shock wave evolution into strain solitary wave in nonlinearly elastic solid bar/ F.E. Garbuzov, A.V. Belashov, A.A. Zhikhoreva, Y.M. Beltukov, I.V. Semenova// Wave Motion. — 2022. — Vol 141. — P. 103022.
- [2] **Liebling M.** Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram / M. Liebling, T. Blu, M. Unser // JOSA A. — 2004. — Vol 21. — № 3. — P. 367–377.
- [3] **Samsonov, A.M.** Direct determination of bulk strain soliton parameters in solid polymeric waveguides / A.M. Samsonov, I.V. Semenova, A.V. Belashov. // Wave Motion. — 2017. — Vol 71. — P. 120-126.

Holographic recording and analysis of spectral composition of elastic wave patterns in polystyrene waveguides

A. A. Zhikhoreva, A. V. Belashov, Y. M. Beltukov, I. V. Semenova

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

We present an approach for analysis of strain wave patterns in transparent materials recorded using digital holography. Analysis of spectral components of longitudinal strain waves was performed at several locations in the waveguide in the course of propagation of the initial shock wave and its evolution into a nonlinear strain solitary wave. The data obtained allowed us to evaluate attenuation of relatively short- and long-wave components and to demonstrate much faster decay of high-frequency wavelets in comparison with the long solitary wave. The dependence of spectral composition of the strain wave on the initial shock wave energy has been analyzed as well, which showed an increase in the relative contribution of long-wave components with shock wave energy.

Keywords: Digital holography, Nonlinear strain solitary wave, Spectral composition

Использование низкокогерентной и когерентной голографической микроскопии для мониторинга клеточных структур в ходе внешнего воздействия

А. А. Жихорева¹, А. В. Белашов¹, П. С. Буторин¹, Т. Н. Беляева², А. В. Салова²,
Е. С. Корнилова², И. В. Семенова¹, О. С. Васютинский¹

¹ Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Институт цитологии Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены результаты сравнительного анализа точности определения оптических и морфологических параметров клеток разными методами фазовой визуализации при использовании когерентного и низкокогерентного излучения. Основными методами исследования клеточных структур в работе являлись низкокогерентная голографическая микроскопия с использованием фазового модулятора света, фазовая визуализация, основанная на решении уравнение переноса интенсивности, и внеосевая когерентная цифровая голографическая микроскопия. В качестве референтного метода использовалась когерентная голографическая томография с высоким пространственным разрешением, достигнутым за счет эффекта синтетической апертуры. Перечисленные методы использовались для исследования изменений клеточных параметров в ходе внешнего воздействия, запускающего разные типы клеточной гибели. Было показано, что лучшее пространственное разрешение достигается при использовании низкокогерентного излучения, а наибольшая точность определения оптической толщины клеток с помощью когерентной голографической микроскопии.

Ключевые слова: количественный фазовый имиджинг, цифровая голографическая микроскопия, фазовое изображение, низкокогерентная голография, внеосевая цифровая голография.

Цитирование: Жихорева, А. А. Использование низкокогерентной и когерентной голографической микроскопии для мониторинга клеточных структур в ходе внешнего воздействия / А. А. Жихорева, А. В. Белашов, П. С. Буторин, Т. Н. Беляева, А. В. Салова, Е. С. Корнилова, И. В. Семенова, О. С. Васютинский // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 390–394.

Введение

Методы фазовой визуализации широко применяются для изучения различных клеточных структур и внутриклеточных процессов. Значительный интерес к этим методам обусловлен низкой инвазивностью данных методов и возможностью получить большое количество информации о морфологических и оптических параметрах клетки и динамике их изменения во времени. Анализ оптических и морфологических параметров в совокупности с методами автоматической классификации успешно был применен для автоматического определения типа гибели живых клеток в ходе фотодинамического воздействия при использовании когерентных методов фазовой визуализации [1]. К методам фазовой визуализации относятся цифровая когерентная голографическая микроскопия, численная фазовая визуализация,

голографическая томография и низкокогерентная голографическая микроскопия. Таким образом, развитие методов фазовой визуализации с возможностью определения как оптических, так и морфологических параметров клеток и применение методов машинного обучения для анализа клеточных параметров представляют большой интерес, что может повысить уровень лабораторной диагностики.

Данная работа, посвящена сравнительному анализу точности определения оптических и морфологических параметров клеток разными методами фазовой визуализации, которым в последнее время посвящено множество публикаций, как при использовании когерентного, так и низкокогерентного излучения. Реализованные методы фазовой визуализации были использованы для мониторинга клеток и определение их параметров в ходе внешнего воздействия.

Методы исследования

В работе проведен анализ трех методов фазовой визуализации клеточных структур как при использовании когерентных, так и низкокогерентных источников излучения. Одним из применяемых методом фазовой визуализации являлась цифровая когерентная голографическая микроскопия (DHM). Голографический микроскоп представлял собой интерферометр Маха — Цендера в предметном пучке, которого установлен микрообъектов с коллимирующей линзой для исследования микроскопических объектов. В качестве источника излучения использовался гелий-неоновый лазер на длине волны 633 нм и малой плотностью излучения 50 мкВт/см², что, как было показано ранее[1], позволяет проводить длительный мониторинг клеток без влияния на внутриклеточные процессы. Восстановление регистрируемой интерференционной картины проводилось численными методами, основанными на Фурье анализе. По восстановленному и развернутому фазовому изображению клеток была проведена сегментация клеток (выделение областей расположения клеток) и определение их оптических и морфологических параметров, таких как средняя оптическая толщина (фазовый сдвиг) клеток, сухая масса клеток, площадь проекции и др. [2].

В работе как же использовалась низкокогерентная голографическая микроскопия, реализованная на базе оптического микроскопа Nikon Eclipse Ti2. Метод SLIM основан на модернизации принципа фазово-контрастной микроскопии, в ходе которого наблюдается интерференционная картина между светом, рассеянным объектом, и исходным световым конусом, прошедшим через исследуемый объект без искажений. Пространственный модулятор света (LCOS-SLM), введенный в оптический путь микроскопа, позволил произвольным образом изменять фазу волны в нерассеянной части света. Регистрация серии осевых интерференционных картин в низкокогерентном свете с заданным сдвигом фазы и численный анализ набора распределений интенсивности (осевых интерференционных картин) методом фазовых шагов (phase shifting) позволили получить пространственное распределение фазового запаздывания, индуцированного клетками в проходящей волне [3].

Вместе с тем, фазовое изображение может быть получено из дефокусированных распределений интенсивности прошедшего света с помощью уравнения переноса интенсивности (transport-of-intensity equation). Данный метод TIE был реализован с помощью оптического микроскопа Nikon Eclipse Ti2, оснащенного высокоточной подвижной по оси z (Prior H117E1) с разрешением 0,01 нм. Данный метод основан на регистрации серии интенсивности света прошедшего через клеточные структуры при заданном изменении положения фокуса z. Метод восстановления изменения фазы волны, прошедшей через образец, основан на уравнении переноса интенсивности излучения (transport-of-intensity equation (TIE))[4] с помощью разных численных методов, например с помощью метода Фурье преобразования, предложенного в работе [5] (FFT-based solver).

Другим методом фазовой визуализации являлась когерентная голографическая томография, в виде коммерчески реализованного голографического томографического микроскопа 3D Cell Explorer Nanolive. Метод основан на регистрации серии интерференционных картин при изменении угла падения предметного пучка на образец во внеосевом интерферометре. Данным методом фазовой визуализации использовался в качестве референтного метода с высоким пространственным разрешением, достигнутым за счет эффекта синтетической апертуры.

Результаты

Был проведен сравнительный анализ фазовых изображений одних и тех же фиксированных клеточных структур разными методами фазовой визуализации, а также определены оптические и морфологические параметры клеток при сравнении с референтным методом – цифровой голографической томографии с высоким пространственным разрешением. Было получено, что использование низкокогерентного источника излучения для методов TIE и SLIM приводит к повышению пространственного разрешения и увеличивает точность определения морфологических параметров более чем на 5% по сравнению с когерентной голографической микроскопией, сопровождающейся когерентным шумом. При этом использование косвенных методов вычисления фазовых распределений и низкокогерентных источников излучения вносит ошибку вычисления фазового запаздывания, индуцированного клетками, порядка 3%.

Три описанных выше метода фазовой визуализации DHM, TIE и SLIM были применены для регистрации нескольких групп клеток HeLa до фотодинамического воздействия (т.е. живых клеток в нормальном состоянии) и после нее, в ходе апоптотических и некротических процессов. Несколько примеров фазовых изображений, полученных с использованием трех методов фазовой визуализации и соответствующих различным состояниям клеток, показаны на рисунке 1. Все три использованных метода продемонстрировали возможность различать различные состояния клеток в ходе качественного анализа фазовых изображений, так и при количественном анализе основных параметров клеток, таких как средний фазовый сдвиг, площадь и сухая масса клетки. В то время как типичный средний фазовый сдвиг живых клеток

HeLa оценивался в диапазоне $\approx 1-1,1$ рад, при использовании всех трех методов визуализации клеток, погибших путем некроза, изменение фазового набега оценивалось примерно на 35-55%. Наблюдаемое экспоненциальное затухание среднего фазового сдвига, по-видимому, обусловлено потерей целостности мембраны и вытеканием внутриклеточной среды. Аналогичное уменьшение среднего фазового набега и сухой массы клеток было зарегистрировано и для других типов живых клеток [1]. С другой стороны, апоптоз клеток линии HeLa приводил к увеличению среднего фазового набега, что было продемонстрировано тремя методами DHM, TIE и SLIM.

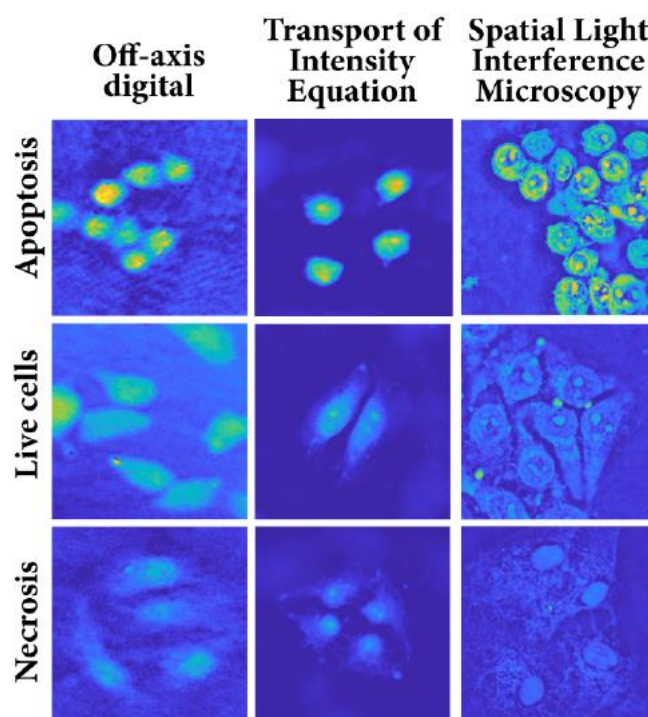


Рис. 1. Примеры для трех методов QPI фазовых изображений живых, апоптотических и некротических клеток HeLa после различных доз фотодинамического воздействия

Заключение

В ходе сравнительного анализа трех когерентных и некогерентных методов фазовой визуализации было показано, что использование некогерентных осевых методов фазовой визуализации приводит к увеличению пространственного разрешения и точности определения морфологических параметров клеточных структур за счет устранения когерентных шумов. Однако, наибольшая точность определения фазового запаздывания, индуцированного клетками, достигается при использовании цифровой голографической микроскопии. Несмотря на это, все реализованные методы фазовой визуализации показали возможность различать выраженные морфологические и оптические изменения клеток в ходе их гибели при внешнем фотодинамическом воздействии. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для автоматической классификации состояния клеток некогерентными методами фазовой визуализации с высокой точностью определения

морфологических параметров, как это было реализовано ранее для когерентных методов фазовой визуализации.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 21-72-10044).

Список источников

- [1] **Belashov A. V.** et al. Machine learning assisted classification of cell lines and cell states on quantitative phase images //Cells. – 2021. – Т. 10. – №. 10. – С. 2587.
- [2] **Kim M. K.**, Kim M. K. Digital holographic microscopy. – Springer New York, 2011. – С. 149-190.
- [3] **Wang Z.** et al. Spatial light interference microscopy (SLIM) //Optics express. – 2011. – Т. 19. – №. 2. – С. 1016-1026.
- [4] **Zuo C.** et al. Transport of intensity equation: a tutorial //Optics and Lasers in Engineering. – 2020. – Т. 135. – С. 106187.
- [5] **Allen L. J.**, Oxley M. P. Phase retrieval from series of images obtained by defocus variation //Optics communications. – 2001. – Т. 199. – №. 1-4. – С. 65-75.

Application of low-coherence and coherent holographic microscopy for monitoring of cells during treatment

A. A. Zhikhoreva¹, A. V. Belashov¹, P. S. Butorin¹, T. N. Belyaeva², A. V. Salova², E. S. Kornilova², I. V. Semonova¹, O. S. Vasyutinskii¹

¹ Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia

² Institute of Cytology of RAS, Saint-Petersburg, Russia

We present the comparative analysis of coherent and low-coherent phase imaging as methods for determination of cellular optical and morphological parameters. Low-coherence holographic microscopy, phase imaging based on the transport of intensity equation and off-axis coherent digital holographic microscopy were used to investigate cells. Coherent holographic tomography with high spatial resolution was reference method. Changes of cellular parameters during different cellular death ways were monitored by these methods. It was shown that the highest spatial resolution is achieved by low-coherence microscopy but the highest accuracy of optical parameters determination is achieved using coherent holographic microscopy.

Keywords: Digital Holographic Microscopy, Cells death, Phase images, Classification.

Метод измерения фазовых искажений когерентной оптической системы на основе пространственно-временного модулятора света

Т. Р. Миниханов, Е. Ю. Злоказов, П. А. Черёмхин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе исследуется проблема измерения и компенсации фазовых искажений в когерентных оптических системах на основе пространственно-временных модуляторов света. В качестве наиболее перспективного метода, не требующего усложнения системы и обладающего высокой степенью универсальности, выбран метод на основе случайных масок и численного восстановления фазовой поверхности с использованием алгоритма Герчберга-Секстона. Приведены результаты численного исследования данного метода.

Ключевые слова: Восстановление фазы, Фазовая модуляция, Пространственно-временные модуляторы света.

Цитирование: Миниханов, Т. Р. Метод измерения фазовых искажений когерентной оптической системы на основе пространственно-временного модулятора света / Т. Р. Миниханов, Е. Ю. Злоказов, П. А. Черёмхин // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 395–397.

Введение

Как известно, в скалярной теории дифракции для описания электромагнитной волны необходимо знать как амплитуду, так и фазу, образующих в совокупности комплексную амплитуду. В современной науке не теряет актуальности задача точного измерения комплексной амплитуды, или волнового фронта. С одной стороны, современные датчики регистрации на основе КМОП или ПЗС технологий полностью теряют информацию о фазовой поверхности электромагнитного поля – с другой, широко распространенные датчики волнового фронта на основе геометрической оптики [1] или интерференционных методов [2] имеют ряд серьёзных недостатков. Одним из таких недостатков является внесение изменений в оптическую схему. Представленные в работе метод позволяет без изменения оптической схемы измерить фазовые искажения системы для последующей компенсации.

1. Основная часть

Как уже обсуждалось, датчики волнового фронта на основе геометрической оптики и интерференционных методов имеют ряд недостатков. Так, например, датчик Шака-Гартмана способен измерять лишь плавные волновые поверхности, что является следствием невысокого разрешения из-за микролинзового растра, а интерференционные датчики неустойчивы к вибрациям, а также требуют модернизации имеющейся оптической схемы. Предложенный метод, в основе которого лежит использование пространственно-временного модулятора света и компьютерные алгоритмы, лишен этих недостатков [3]. Более того,

пространственно-временные модуляторы света сами вносят искажения в оптическую схему, поэтому метод способен детектировать и эти искажения.

2. Численное моделирование

В алгоритмической базе метода измерения фазовых искажений когерентных оптических систем был положен итерационный метод Герчберга-Секстона [4]. Блок – схема метода реконструкции волнового фронта представлена на рисунке 1. Для моделирования процесса в качестве фазовых искажений в плоскости камеры была выбрана оптическая мира для определения качества оптической системы.

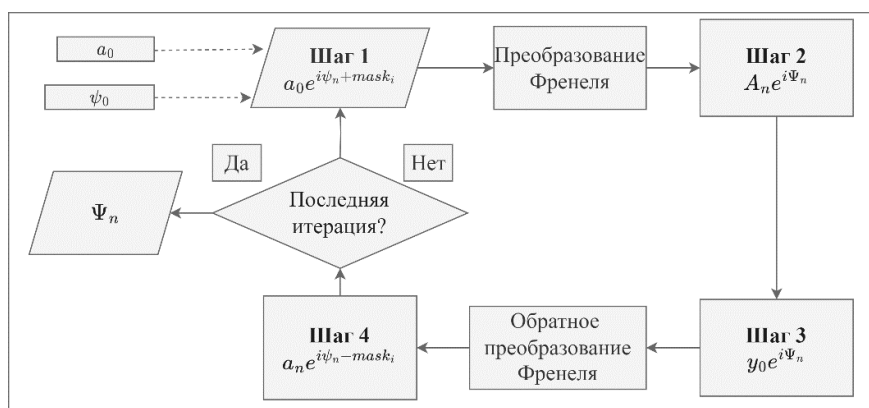


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

Для каждой итерации алгоритма, используя численную модель дискретного преобразования Френеля, были получены изображения фазового искажения y_0^2 с наложенными случайными масками $mask$. После замены коэффициента A_n в комплексной амплитуде поля на y_0 . Выполнялось обратное преобразование Френеля. Затем наложенная случайная маска убиралась из расчёта на данной итерации. Результат работы алгоритма моделирования метода измерения фазовых искажений приведен на рис. 2.

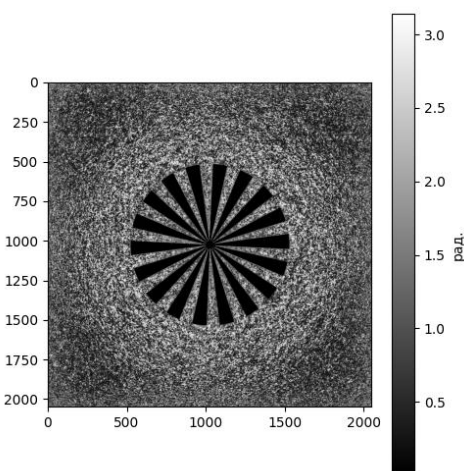


Рис. 2. Восстановленные фазовые искажения

Исходя из результата можно заметить, что описанный выше метод позволяет получать фазовую поверхность с высоким разрешением.

Выводы

В работе был продемонстрирован метод измерения фазовых искажений оптической системы. Продемонстрирован результат численного моделирования процесса восстановления волнового фронта.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список источников

- [1] **Platt B.** History and principles of shack-hartmann wavefront sensing / B. Platt, R. Shack // Journal of Refractive Surgery. — 2001. — Vol 17. — № 1. — P.573–577.
- [2] **Medecki H.** Phase-shifting point diffraction interferometer / H. Medecki, E. Tejnil, K. Goldberg, // Optics Letters. — 1996. — Vol 21. — № 19. — P. 1526–1528.
- [3] **Yicheng W.** WISH: wavefront imaging sensor with high resolution/ W. Yicheng, M. Sharma, A.Veeraraghavan// Light: Science and Applications. — 2019. — Vol.8. — P.44— DOI:10.1038/s41377-019-0154-x
- [4] **Gerchberg W.** A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Pictures / W. Gerchberg, R. Saxton//Optic. — 1972. — Vol.35. — № 19 — P.1–6

Measurement phase distortions of a coherent optical system method based on spatial light modulator

T. Z. Minikhanov, E. Y. Zlokazov, P. A. Cheremkhin

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

The problem of measuring and compensating phase distortions in coherent optical systems based on spatial light modulators was investigated. The method based on random masks and numerical reconstruction of the phase surface using the Gerchberg-Sexton algorithm was used. This method was chosen as the most promising method that does not require complication of the system and has a high degree of versatility. The results of numerical investigation of the method are presented.

Keywords: Phase retrieval, Phase modulation, Spatial light modulators.

Исследование процесса формирования оптических вихрей в ближнем поле локализованных хиральных жидкокристаллических структур на дифракционном фазовом микроскопе

А. А. Мисюра, А. В. Черных, К. А. Герасимов, Д. Д. Дармороз, Т. Орлова, Н. В. Петров

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе проведено исследование формирования оптических вихрей в образцах хиральных нематических жидких кристаллов, состоящих из ансамблей локализованных солитонных структур. Известно, что такие структуры можно рассматривать как аналог q-пластины, которая используется для формирования вихревых и векторных пучков. В данной работе, с помощью дифракционного фазового микроскопа исследовалась структура светового поля, формируемого локализованными хиральными жидкокристаллическими структурами, расположенными между двумя ахроматическими четвертьволновыми пластинками. В ходе работы были записаны серии цифровых голограмм, из которых были восстановлены фазовые распределения световых пучков с сингулярными точками, то есть обнаружены оптические вихри.

Ключевые слова: Оптические вихри, Цифровая голографическая микроскопия, Локализованные жидкокристаллические структуры.

Цитирование: Мисюра, А. А. Исследование процесса формирования оптических вихрей в ближнем поле локализованных хиральных жидкокристаллических структур на дифракционном фазовом микроскопе / А. А. Мисюра, А. В. Черных, К. А. Герасимов, Д. Д. Дармороз, Т. Орлова, Н. В. Петров // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 398–401.

Введение

Жидкие кристаллы сочетают в себе оптические свойства кристаллических твердых тел и текучесть изотропных жидкостей. Они способны формировать чрезвычайно богатый спектр жидкокристаллических текстур с естественно возникающими топологическими дефектами, а также искусственно созданные топологические ориентационные структуры [1]. В тонких пленках хиральных нематических жидких кристаллов наблюдаются метастабильные локализованные солитоны, ориентационная структура которых может сочетать как сингулярные, так и несингулярные особенности [2]. Жидкокристаллические солитоны уже были продемонстрированы как генераторы оптических вихрей и векторных лазерных пучков [1, 3]. В целом известно несколько способов формирования оптических вихрей, однако метод, основанный на использовании топологических солитонов в жидких кристаллах, является особенно привлекательным, так как является неинвазивным. Исследования оптических вихрей в дальней зоне дифракции дали новый толчок в разработке жидкокристаллических дисплеев [4] и электрооптических устройств на основе жидких кристаллов. Однако

исследования структуры и особенностей светового поля в ближней зоне дифракции никогда ранее не проводились.

В работе при помощи фазового цифрового голографического микроскопа производится запись цифровых голограмм пленок хиральных нематических кристаллов с топологическими солитонами, по которым восстановлены фазовые изображения.

1. Описание схемы установки

В рассматриваемом дифракционно-фазовом микроскопе [5] (Рис. 1) от диода (LED) излучение с длиной волны 650 нм, проходя через объектив цифрового голографического микроскопа (MO1, MO2), освещает исследуемый образец (OBJ). Далее световой пучок отражается от двух зеркал (M1, M2), проходит через линзу (L1) и попадает на амплитудную решетку (G), генерирующую несколько порядков дифракции, содержащих полную пространственную информацию об образце. Затем осуществляется пространственная фильтрация при помощи 4-f системы, образованной двумя линзами (L2, L3) и пространственным фильтром (SF), который формирует опорную и предметную волны. Нулевой дифракционный порядок претерпевает фильтрацию на круглой апертуре размером 25 мкм и в интерференционном поле выполняет роль опорной волны, первый же, напротив, свободно проходит фильтр через щель шириной в 2 мм и действует как предметная волна; все остальные дифракционные порядки полностью блокируются. Излучение попадает на камеру (CMOS), записывающую результат интерференции опорной и предметной волн.

Для исследования процесса формирования оптических вихрей локализованными жидкокристаллическими структурами оптическая схема была оснащена поляризатором, двумя четвертьволновыми пластинами и анализатором как показано на Рис.1.

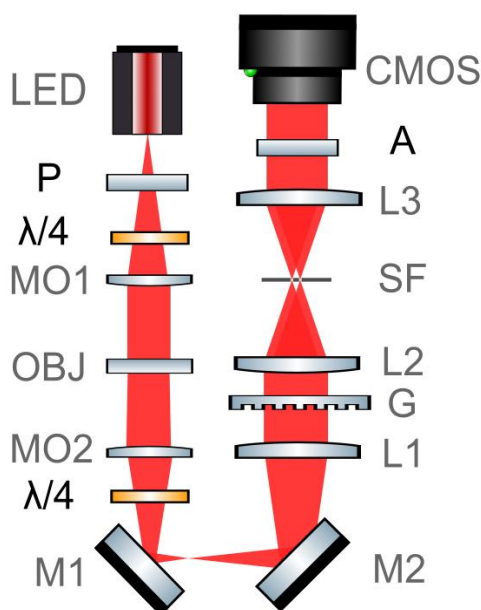


Рис. 1. Схема фазового цифрового голографического микроскопа

2. Объект исследования

Хиральный нематический жидкий кристалл был приготовлен допированием нематического жидкого кристалла HPC850600-100 (HCCN) хиральной добавкой S-811 (HCCN). Готовая жидкокристаллическая смесь помещалась в коммерческие жидкокристаллические ячейки толщиной 10 микрон с перпендикулярными условиями сцепления на подложках (E.N.C. Japan). Как известно, в том случае, когда значение шага спирали хирального нематика заметно превышает величину критического шага, определяемого толщиной образца и константами упругости жидкого кристалла, в образце происходит фрустрация холестерической спирали. Однако, если шаг спирали хирального нематика сопоставим с критическим шагом, в жидкокристаллическом образце наблюдается самопроизвольное формирование различных метастабильных хиральных структур, такие как протяженные холестерические “пальцы” и локализованные холестерические сферулиты [6]. В приготовленном нами образце, поляризационные оптические изображения самопроизвольно сформировавшихся локализованных структуры были аналогичны изображениям жидкокристаллических вихревых генераторов [3], и потому были выбраны для дальнейшего исследования их оптических свойств.

3. Восстановление фазового изображения объекта

Для восстановления комплекснозначной волны из цифровых голограмм (Рис. 2) был использован метод двойного преобразования Фурье с фильтрацией в частотной плоскости [7]. Сначала производилось вычисление преобразования Фурье, после чего к Фурье-спектру применялась пространственно-частотная фильтрация спектра совместно с центрированием первого порядка дифракции, затем выполнялось обратное преобразование Фурье.

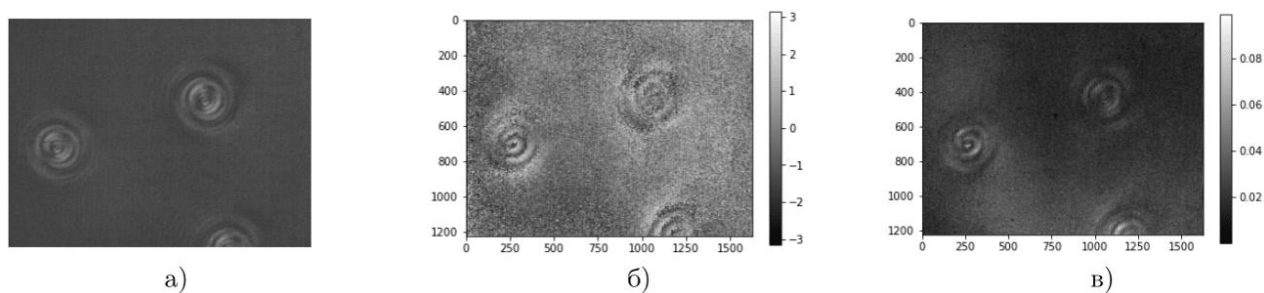


Рис. 2. Цифровая голограмма исследуемого объекта (а), восстановленное фазовое (б) и амплитудное (в) изображения объекта

На восстановленных фазовых распределениях присутствует набег вокруг центра сферулита в 4π радиан, что свидетельствует о наличии оптических вихрей с двойным топологическим зарядом в поле исследуемого образца.

Заключение

В работе с помощью метода дифракционной фазовой микроскопии были зарегистрированы и исследованы волновые фронты, которые формируются локализованными хиральными

жидкокристаллическими структурами. На образец попадает световой пучок с круговой поляризацией. В одной из равных круговых компонент формируется оптический вихрь. На полученных восстановленных фазовых изображениях заметно высокое влияние шума, которое в дальнейшем планируется также минимизировать при помощи усреднения фаз.

Список источников

- [1] **Papič M.** Topological liquid crystal superstructures as structured light lasers / M. Papič, U. Murb, K. P. Zuhail, M. Ravnika, I. Mušević, M. Huma // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2021. — Vol 118. — № 49. — P. e2110839118.
- [2] **Ackerman P. J.** Diversity of knot solitons in liquid crystals manifested by linking of preimages in torons and hopfions / P. J. Ackerman, I. I. Smalyukh // *Journal of Optics*. — 2017. — Vol 7. — № 1. — P. 011006.
- [3] **Yang B.** Arbitrary vortex arrays realized from optical winding of frustrated chiral liquid crystals / B. Yang, E. Brasselet // *Journal of Optics*. — 2013. — Vol 15. — № 4. — P. 044021.
- [4] **Coles H. J.** Liquid crystal ‘blue phases’ with a wide temperature range / H. J. Coles, M. N. Pivnenko // *Nature*. — 2005. — Vol 436. — № 7053. — P. 997–1000.
- [5] **Bhaduri B.** Diffraction phase microscopy: principles and applications in materials and life sciences / B. Bhaduri, C. Edwards, H. Pham, R. Zhou, T. H. Nguyen, L. L. Goddard, G. Popescu // *Advances in Optics and Photonics*. — 2014. — Vol 6. — №1. — P. 57–119.
- [6] **Oswald P.** Nematic and Cholesteric Liquid Crystals Concepts and Physical Properties Illustrated by Experiments / P. Oswald, P. Pieranski. — CRC press, 2005. — 618 p.
- [7] **Takeda M.** Fourier fringe analysis and its application to metrology of extreme physical phenomena: a review / M. Takeda // *Applied Optics*. — 2013. — Vol. 52. — №. 1. — P. 20-29.

Investigation of the formation of optical vortices in the near field of localized chiral liquid crystal structures on a diffraction phase microscope

A. A. Misura, A. V. Chernykh, K. A. Gerasimov, D. D. Darmoroz, T. Orlova, N. V. Petrov
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The study investigates the formation of optical vortices in samples of chiral nematic liquid crystals composed of ensembles of localized soliton structures. It is known that such structures can be considered as an analog of a q-plate, which is used to generate vortex and vector beams. In this study, the structure of the light field formed by localized chiral liquid crystalline structures located between two achromatic quarter-wave plates was investigated using a diffraction phase microscope. Series of digital holograms were recorded, from which the phase distributions of the light beams with singular points, i.e., optical vortices, were reconstructed.

Keywords: Optical vortices, Digital holographic microscopy, Localized liquid crystalline structures.

Исследование квантования фазовых распределений при фазовой модуляции посредством цифрового микрозеркального устройства и компьютерной голографии Ли

А. О. Георгиева, А. В. Черных, Н. В. Петров

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В настоящем докладе приведено исследование квантования фазовых распределений при амплитудно-фазовой модуляции посредством бинарного цифрового микрозеркального устройства, компьютерной голографии Ли и пространственной Фурье-фильтрации в зависимости от несущих частот бинарной голограммы. Представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований структурированных пучков и произвольных распределений для исследования связи наклона несущих полос на КСГ и квантования получаемых фазовых распределений. На примере расчета ошибок гистограммы значений фазы продемонстрировано снижение ошибки квантования получаемых фазовых распределений по отношению к квантованию целевых распределений при увеличении наименьшего общего кратного периодов бинарной голограммы.

Ключевые слова: Цифровое микрозеркальное устройство, Модуляция, Квантование изображений, Бинаризация, Компьютерная голография Ли.

Цитирование: Георгиева, А. О. Исследование квантования фазовых распределений при фазовой модуляции посредством цифрового микрозеркального устройства и компьютерной голографии Ли / А. О. Георгиева, А. В. Черных, Н. В. Петров // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 402–409.

Введение

Компьютерная голография находит широкое применение в современной фотонике, например, в таких приложениях как хранение голографических данных [1,2], манипулирование световыми полями [3], генерация структурированного света [4]. В данной методике на основе дифракционных алгоритмов синтезируются компьютерные голограммы для дальнейшего аналогового вывода, например, на пространственно-временные модуляторы света (ПВМС). В качестве ПВМС часто используется цифровое микрозеркальное устройство (ЦМУ), которое отличается высокой частотой переключения паттернов и высоким пространственным разрешением [5]. Основным элементом ЦМУ является матрица микрозеркал, каждое из которых представляет собой отдельный пиксель проецируемого изображения и может поворачиваться на $+12^\circ$ или -12° . Данное устройство является бинарным, то есть модулирует только амплитуду волнового фронта [6]. Однако, используя методы компьютерной голографии возможно осуществлять амплитудно-фазовую модуляцию посредством использования телескопической системы с Фурье-фильтрацией дифракционных порядков.

Существует множество методов компьютерной голографии для генерации бинарных компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ), чтобы реализовать амплитудно-фазовую

модуляцию с помощью ЦМУ [7,8], одним из самых простых и быстрых является метод голографии Ли, применяющийся для исследования быстропротекающих процессов [9].

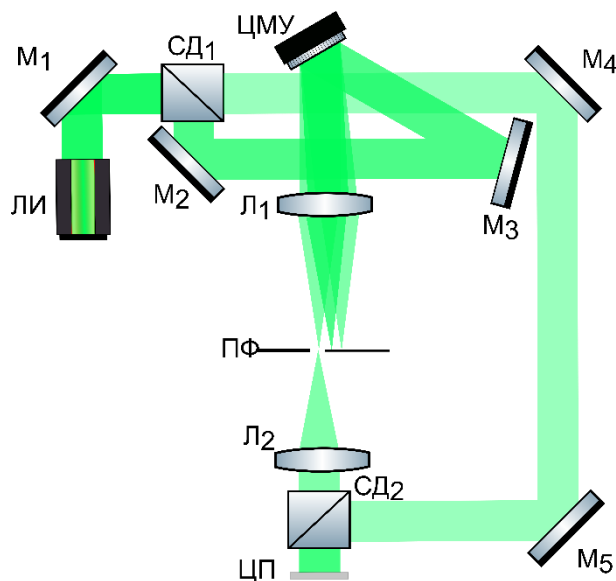
Одним из критериев качества фазовой модуляции является точность воспроизведения дискретных уровней градаций фазы, или квантованием фазовых распределений. В голографии Ли квантование зависит от периода бинарных полос на КСГ. Кроме того, период влияет на расстояние между дифракционными порядками в Фурье-плоскости, в зависимости от которого выбирается размер апертуры для фильтрации, что определяет пространственное разрешение получаемых распределений [10]. Применение пространственной фильтрации подразумевает использование достижения максимально возможного расстояния между дифракционными порядками для обеспечения высокого пространственного разрешения получаемых распределений. Чаще всего, при синтезе/регистрации голограммы несущие полосы ориентируют перпендикулярно диагонали ПВМС/матричного детектора. При этом расстояние между дифракционными порядками максимально, т.е. возможно обеспечивается максимально возможное пространственное разрешение посредством увеличения размера апертуры для фильтрации. Однако увеличить расстояние между дифракционными порядками можно посредством уменьшения периода несущих полос, которое предполагает снижение квантования [10], которое критично для целевых распределений, обладающих большим количеством различных градаций фазы. Таким образом, мы приходим к следующей постановке задачи: обеспечение максимально возможного квантования фазовых распределений при минимально допустимом для данного распределения пространственном разрешении при использовании метода голографии Ли.

1. Экспериментальная установка

Проведение экспериментальных исследований квантования фазовых распределений в зависимости от угла наклона бинарных полос КСГ, синтезированных по методу голографии Ли, осуществлялось посредством установки, схема которой показана на рис. 1.

Для возможности точного измерения получаемых амплитудно-фазовых распределений система оснащена опорным плечом, которое позволяет рассматривать установку как интерферометр Маха-Цендера. Лазерное излучение ($\lambda = 532$ нм) разделялось светоделителем СД₁ на объектный и опорный пучок. Объектный падал на матрицу ЦМУ (DMD DLP6500, 1920×1080, 7,56 мкм), на которую подавалась бинарная компьютерно-синтезированная голограмма по методу Ли с закодированными целевыми амплитудным и фазовым распределением, методика подробно описана в работе [10]. Отраженный от ЦМУ пучок проходил через телескопическую систему с линзами L_1 ($f_1 = 200$ мм) и L_2 ($f_2 = 100$ мм) с пространственной Фурье-фильтрации в общей плоскости. В плоскости формирования изображения телескопической системы (целевой плоскости – ЦП) формируется получаемый волновой фронт, отличающийся от целевого на некоторое значение ошибки модуляции. Опорный пучок проходил через систему зеркал и отражался от светоделителя СД₂, формируя в ЦП внеосевую цифровую голограмму вместе с объектным пучком. В ЦП размещалась

регистрирующая КМОП-камера. Восстановление фазы из регистрируемых цифровых голограмм производилось с помощью метода локальных наименьших квадратов [11,12].



ЛИ — лазерный источник; М₁₋₅ — зеркала; СД₁₋₂ — светоделители; ЦМУ — цифровое микрозеркальное устройство; Л₁₋₂ — линзы; ПФ — пространственный фильтр; ЦП — целевая плоскость

Рис. 1. Экспериментальная схема для амплитудно-фазовой модуляции с помощью ЦМУ и голографического контроля

В качестве целевых фазовых распределений для оценки квантования использовались как структурированные пучки в виде оптического вихря, конической фазы, плоской наклонной фазы, так и произвольные распределения. Однако пространственное распределение фазы оптического вихря с зарядом 1 позволило наиболее наглядно продемонстрировать изменение квантования получаемых фазовых распределений в зависимости от периодов бинарной КСГ по осям x и y , которые в свою очередь определяют угол наклона бинарных полос.

2. Принцип оптимального квантования фазовых распределений в голографии Ли

Для решения сформулированной задачи данного исследования введем понятие ячейки растра (рис. 2), представляющей собой фрагмент бинарной КСГ, размер которого (с учетом некоторых допустимых пределов) соответствует одному дробному периоду несущей полосы, для большей точности вычисляемого с использованием большого количества несущих полос перпендикулярно направлению бинарных полос. Угол наклона бинарных полос на КСГ определяется с помощью T_x и T_y – периодов по осям x и y : $\theta = \arctg(T_y / T_x)$.

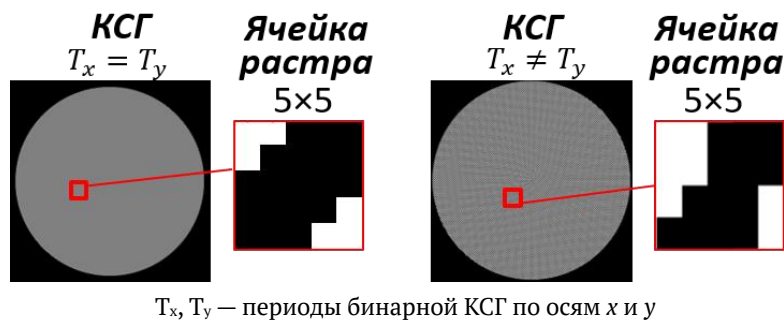


Рис. 2. Бинарные компьютерно-синтезированные голограммы с разными углами наклона бинарных полос и соответствующие ячейки растра

Как показано на рис. 2, нами был выбран размер ячейки растра 5×5 пикселей. Таким образом, максимальный общий период бинарной КСГ составляет 5 пикселей. Соответственно, для оценки квантования получаемых распределений в зависимости от угла наклона полос рассматриваются только случаи, для которых общий период составляет от 3,5 до 5 пикселей.

При бинаризации количество кодируемых градаций фазы определяется количеством вариаций задания бинарной полосы на КСГ. В случае плоской фазы формулу для определения данного параметра можно записать следующим образом:

$$N_q = \text{lcm}(T_x, T_y) \cdot 2^{(T_x \cdot T_y) \bmod 2}, \quad (1)$$

где $\text{lcm}(T_x, T_y)$ – наименьшее общее кратное T_x, T_y . Количество возможных кодируемых градаций фазы на КСГ является параметром, с помощью которого можно охарактеризовать квантование фазовых распределений, получаемых при фазовой модуляции с помощью ЦМУ.

3. Результаты исследования квантования фазовых распределений в зависимости от параметров КСГ, синтезированных по методу голографии Ли

Для исследования связи N_q и квантования получаемых фазовых распределений было проведено численное моделирование и экспериментальная апробация фазовой модуляции с помощью ЦМУ, голографии Ли и телескопической системы с пространственной фильтрации для целевого распределения в виде оптического вихря с зарядом 1 при вариации периодов бинарной КСГ по осям x и y (рис. 3).

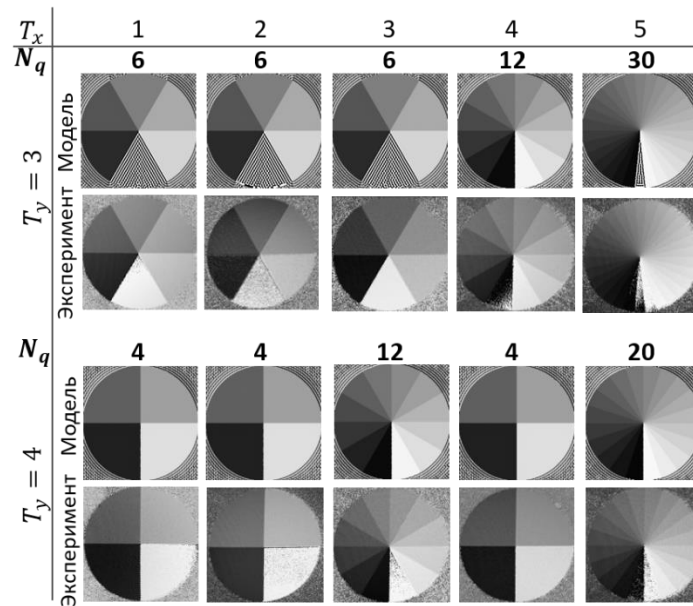


Рис. 3. Получаемые фазовые распределения оптического вихря для численного моделирования и эксперимента при вариации T_x и T_y

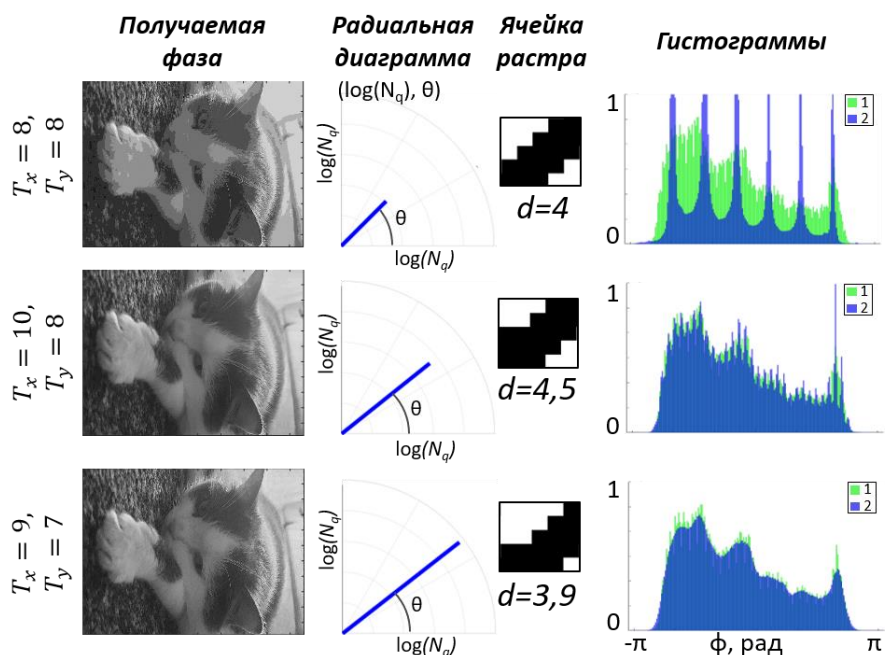
На каждом изображении круг поделен на секторы, характеризующие определенную градацию фазы. Периоды T_x и T_y варьировались, как указано на рис. 3, $T_x = 1-5$ пк, $T_y = 3-4$ пк, над распределениями указано значение N_q . Как видно из рисунка, количество секторов в моделировании и эксперименте соответствует значению N_q . Однако количество уровней квантования получаемых фазовых распределений не строго равняется N_q , т.к. количество вариаций бинарной полосы в данном случае увеличивается за счет кодирования центральной части, отличной от кодирования плоской фазы, что добавляет дополнительные вариации бинарной полосы, а также за счет наличия дифракционных эффектов. Тем не менее, вклад обозначенных эффектов меньше, чем разница между основными уровнями, соответствующим N_q . Таким образом, параметр N_q может быть использован для характеристики качества квантования, однако не является количеством уровней квантования для получаемой фазы.

Оценка качества квантования фазовых распределений, получаемых в результате фазовой модуляции с помощью ЦМУ, проводилась посредством оценки среднеквадратичного отклонения (СКО) гистограммы значений получаемого фазового распределения относительно гистограммы значений целевой фазы:

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (x_t - x_r)^2}, \quad (2)$$

где n – количество пикселей на распределении, x_t, x_r – значения пикселя целевой и получаемой фаз.

На рис. 4 продемонстрированы результаты численного моделирования фазовой модуляции произвольного распределения и оценка квантования получаемой фазы.



1 столбец – получаемые фазовые распределения; 2 столбец – радиальная диаграмма, где $\log(N_q)$ – полярный радиус, θ – полярный угол; 3 столбец – ориентация несущих полос в ячейке раstra, под ними указано значение периода бинарной КСГ; 4 столбец – гистограммы целевого и получаемых распределений, 1 – гистограмма целевой фазы, 2 – гистограмма получаемой фазы

Рис. 4. Результаты численного моделирования фазовой модуляции произвольного распределения

На рис. 4 каждая строка соответствует определенным значениям T_x и T_y , указанным слева от получаемых фазовых распределений. Продемонстрированы результаты для трех комбинаций периодов бинарной КСГ по осям x и y , соответствующих значениям общего периода КСГ $d = 4$, $d = 4,5$, $d = 3,9$ пикселей для 1, 2, 3 строк, соответственно. Радиальные диаграммы отражают значение N_q для каждой КСГ, а также угол наклона бинарных полос θ . Для наглядной демонстрации зависимости квантования получаемых фазовых распределений от N_q , результаты расположены в порядке возрастания N_q .

Для случая равных периодов (1 строка рисунка 3), т.е. для угла наклона полос 45° , $N_q = 8$, что приводит к появлению пиков на гистограмме, СКО гистограммы для данного случая составило 0,172 рад. Во втором случае использовалась КСГ с большим периодом по одной оси, угол наклона полос составлял 39° . Кроме того, для данной КСГ увеличивается параметр $N_q = 40$, что привело к сглаживанию гистограммы, и, соответственно, снижению СКО гистограммы, которое составило 0,072 рад. Третий случай соответствует меньшему значению периода бинарной КСГ, однако большему значению $N_q = 128$, что выразилось в большем сглаживании гистограммы и снижении НСКО до 0,056 рад. Таким образом, для того, чтобы увеличить квантование получаемого фазового распределения при фазовой модуляции посредством ЦМУ и компьютерной голографии Ли, необходимо выбрать не большее значение периода бинарной КСГ, а максимальное N_q , рассчитываемое по формуле (1).

Заключение

Квантование фазовых распределений при амплитудно-фазовой модуляции при использовании ЦМУ, компьютерной голографии Ли и телескопической системы с пространственной фильтрацией может быть увеличено посредством увеличения наименьшего общего кратного периодов бинарной КСГ по осям x и y , удваиваемого в случае обоих нечетных периодов. Увеличение квантования иллюстрируется снижением ошибки гистограммы значений получаемой фазы относительно целевой фазы. Данное исследование может быть применено для увеличения точности модуляции фазы посредством ЦМУ.

Список источников

- [1] **Curtis, K.** Holographic Data Storage / K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, M. Ayres — JohnWiley & Sons: Hoboken, 2011. — 438 с.
- [2] **Yoneda, N.** Binary Computer-Generated-Hologram-Based Holographic Data Storage / N. Yoneda, Y. Saita, T. Nomura // Applied Optics. — 2019. — Vol. 58. — № 12. — P. 3083–3090.
- [3] **Sun, B.** Four-dimensional light shaping: Manipulating ultrafast spatiotemporal foci in space and time / B. Sun, P. S. Salter, C. Roider, A. Jesacher, J. Strauss, J. Heberle, M. Schmidt, M. J. Booth // Light: Science & Applications. — 2018. — Vol. 7. — P. 17117.
- [4] **Rubinsztein-Dunlop, H.** Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M. V. Berry, M. R. Dennis, D. L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, C. Alpmann, P. Banzer, T. Bauer, et al. // Journal of Optics. — 2017. — Vol. 19. — P. 013001.
- [5] **Turtaev, S.** Comparison of nematic liquid-crystal and DMD based spatial light modulation in complex photonics / S. Turtaev, I. T. Leite, K. J. Mitchell, M. J. Padgett, D. B. Phillips, T. Čižmár // Optics Express. — 2017. — Vol. 25. — P. 29874–29884.
- [6] **Ren, Y.** Tailoring light with a digital micromirror device / Y. Ren, L. Rong-de, L. Gong // Annalen der Physik. — 2015. — Vol. 527. — P. 447–470.
- [7] **Cheremkhin, P. A.** Comparative appraisal of global and local thresholding methods for binarisation of off-axis digital holograms / P. A. Cheremkhin, E. A. Kurbatova // Optics and Lasers in Engineering. — 2019. — Vol. 115. — P. 119–130.
- [8] **Zamkotsian, F.** The Island CGH, a new coding scheme: concept and demonstration / F. Zamkotsian, G. Pariani, R. Alata, L. Oggioni, P. Lanzoni, C. Bertarelli, A. Bianco // Optics Express. — 2019. — Vol. 27. — P. 26446–26458.
- [9] **Conkey, D. B.** High-speed scattering medium characterization with application to focusing light through turbid media / D. B. Conkey, A. M. Caravaca-Aguirre, R. Piestun // Optics Express. — 2012. — Vol. 20. — P. 1733.
- [10] **Georgieva, A.** Optimization of DMD-based independent amplitude and phase modulation by analysis of target complex wavefront / A. Georgieva, A. V. Belashov, N. V. Petrov // Scientific Reports — 2022. — Vol. 12. — P. 7754.
- [11] **Liebling, M.** Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram / M. Liebling, T. Blu, M. Unser // Journal of the Optical Society of America A. — 2004. — Vol. 21. — P. 367–377.
- [12] **Katkovnik V.** Wavefront reconstruction in digital off-axis holography via sparse coding of amplitude and absolute phase / V. Katkovnik, I. A. Shevkunov, N. V. Petrov, K. Egiazarian // Optics Letters. — 2015. — Vol. 40. — P. 2417–2420.

The study on quantization of phase distributions during phase modulation with a digital micromirror device and Lee computer holography

A. O. Georgieva, A. V. Chernykh, N. V. Petrov

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

This paper presents a study on quantization of the phase distributions under amplitude-phase modulation performed with a binary digital micromirror device, Lee computer holography and spatial Fourier filtering, depending on the carrier frequencies of the binary hologram. Results of numerical simulations and experimental studies of structured beams and arbitrary distributions are presented to study quantization of phase distributions depending on the carrier fringes inclination angle on binary computer-generated holograms. By the example of calculation of histogram errors of phase values, the reduction of quantization error of obtained phase distributions in relation to quantization of target distributions with increasing the least common multiple of binary hologram periods is demonstrated.

Keywords: Digital micromirror device, Modulation, Image quantization, Binarization, Lee computer holography.

Фото- и электро-управляемые дифракционные оптические элементы на основе жидких кристаллов

А. Ю. Бобровский, В. П. Шibaев

Химический факультет московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

Одним из перспективных подходов к созданию дифракционных оптических элементов является использование низкомолекулярных и полимерных жидкокристаллических композитов. Эти материалы сочетают в себе оптические свойства жидких кристаллов с возможностью тонкой настройки их свойств внешними воздействиями, такими как электрическое поле и свет, что приводит к формированию периодических дифракционных структур. В данной статье представлен краткий мини-обзор некоторых принципов создания этих периодических структур на основе жидкокристаллических низкомолекулярных и полимерных систем с описанием основных характеристик и преимуществ полученных материалов.

Ключевые слова: Жидкие кристаллы, Жидкокристаллические полимеры, Электрооптика
Дифракционные оптические элементы, Голография, Фотохромизм.

Цитирование: **Бобровский, А. Ю.** Фото- и электро-управляемые дифракционные оптические элементы на основе жидких кристаллов / А. Ю. Бобровский, В. П. Шibaев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 410–419.

Введение

Создание материалов для дифракционной оптики является одной из важнейших задач в связи с широким спектром их применения в фотонике и оптоэлектронике, в частности, для создания дисплеев дополненной и виртуальной реальности. Среди них жидкокристаллические (ЖК) периодические структуры являются одними из наиболее перспективных, так как сочетают в себе уникальные оптические свойства, обусловленные большой анизотропией показателя преломления, с одной стороны, а также лёгкость изменения молекулярного порядка или ориентации под влиянием внешних полей и света или под действием обработки поверхностей ЖК ячеек [1-5]. На данный момент известно большое количество методов создания переключаемых дифракционных решеток (ДР) на основе жидких кристаллов, например, голографическая запись [2], фотоориентация [3], механическое воздействие [4], приложение электрического поля [1, 5] и т.д.

В наших исследованиях были разработаны подходы к созданию новых типов дифракционных оптических элементов на основе жидких кристаллов холестерического и нематического типов. Особое внимание уделено ЖК системам образующим холестерическую фазу, так как её спиральная надмолекулярная структура (рис. 1) предопределяет не только уникальные оптические свойства, такие как брэгговское отражение света, но и приводит к спонтанному формированию периодических структур под действием электрического поля или в ячейках с гибридными граничными условиями (см. ниже). Длина волны брэгговского

отражения света холестериков в случае нормального направления отражения определяется простым соотношением $\lambda_{\max}=nP$, где n – средний показатель преломления, P – шаг спирали.

Материалы, полученные и исследованные в нашей работе, можно разделить на несколько групп согласно принципу их получения:

1. Фото-вращаемые дифракционные решётки (ДР) спонтанно формирующиеся в холестерических слоях с гибридными гомео-планарными граничными условиями [6].
2. ДР сформированные электроиндуцированным искажением холестерической спиральной структуры [5].
3. Фотозапись ДР за счёт раскрутки холестерической спирали [7] и изменения величины λ_{\max} .
4. Фото- и электроактивные ДР полученные на основе нематических систем «темплатным» методом [8].

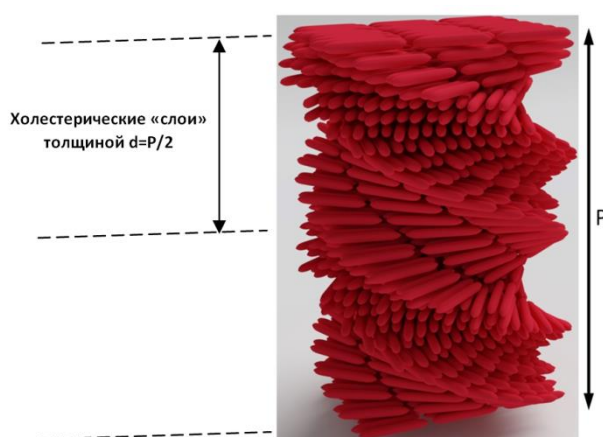


Рис. 1. Схематическое изображение структуры холестерической мезофазы; P – шаг спирали.

На рисунке также показаны условные т.н. холестерические «слои».

В данной статье представлен мини-обзор принципов создания периодических структур на основе ЖК систем с описанием основных характеристик и преимуществ полученных материалов.

Результаты и обсуждение

1. ДР в холестерических слоях с гибридными гомео-планарными граничными условиями

Одним из эффективных подходов к формированию ДР в ЖК системах является использование плоскопараллельных ячеек с гибридными гомео-планарными граничными условиями [9]. Схематическое изображение ориентированного в такой ячейке слоя холестерика представлено на рис. 2а.

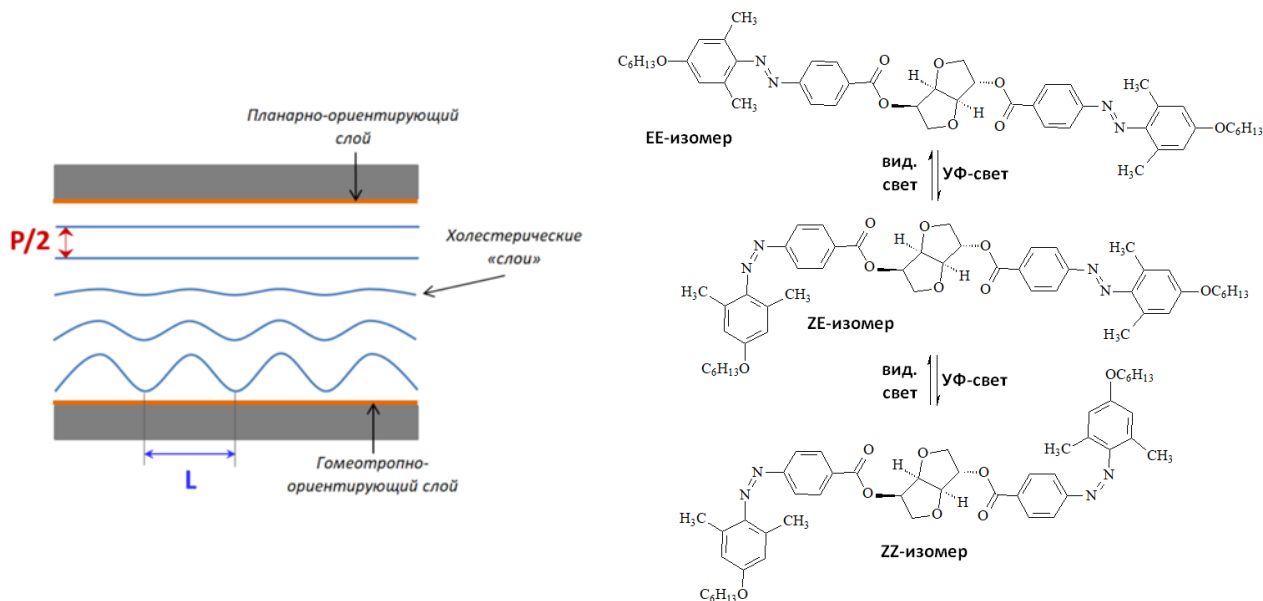


Рис. 2. (а) Схема спонтанного периодического искажения холестерической структуры в ячейке с гомео-планарными граничными условиями, P – шаг спирали, L – период решётки; (б) Схема процесса E-Z фотоизомеризации хирально-фотохромного азобензольного допанта.

Одна подложка вызывает однородную планарную ориентацию, тогда как противоположная подложка стимулирует гомеотропную (вертикальную) ориентацию ЖК молекул. Вблизи гомеотропно-ориентирующей подложки холестерические «слои» стремятся сориентироваться вертикально, однако их поворот затруднён планарной ориентацией на противоположной подложке. В результате для минимизации свободной энергии под действием упругих сил «холестерические слои» претерпевают синусоидальную периодическую деформацию.

В работе Рябчуна с соавт. [6] была разработан подход к созданию холестерической ЖК смеси с фотооптически и обратимо настраиваемым и инвертируемым шагом спирали. Она содержит азобензольный хирально-фотохромный допant, способный претерпевать обратимую фотоизомеризацию и изменение закручивающей способности (рис. 2б). Полученная холестерическая смесь в гибридных (гомео-планарных) граничных условиях самопроизвольно образует хорошо ориентированные периодические домены (рис. 3). Под действием света происходит изменение шага спирали за счет процесса фотоизомеризации допанта, что, в свою очередь, приводит к изменению периода доменной структуры и ее вращению (рис. 3). Это позволяет быстро вращать дифракционную картину при облучении (рис. 4). Более того, попеременное воздействие УФ и видимого света позволяет реализовать вращение ДР решеток по часовой стрелке и против часовой стрелки за счёт процессов прямой и обратной E-Z изомеризации (рис. 2б).

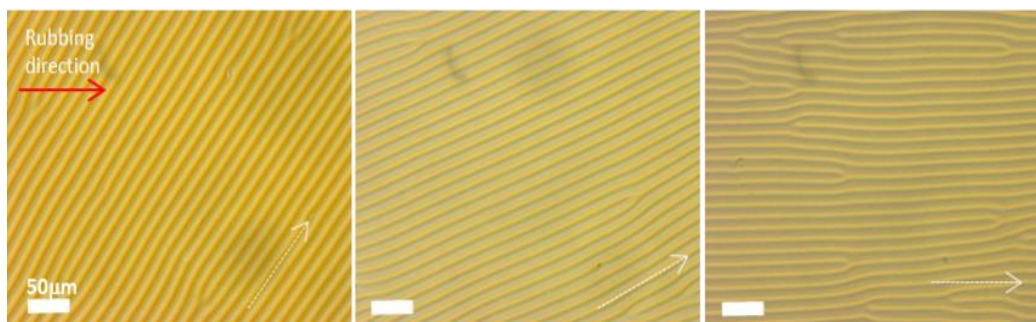


Рис. 3. Поляризационно оптическое микроизображение вращения холестерической ДР в ходе УФ облучения (365 нм, 0.56 мВт/см²; слева направо: 0, 8, 16 с)

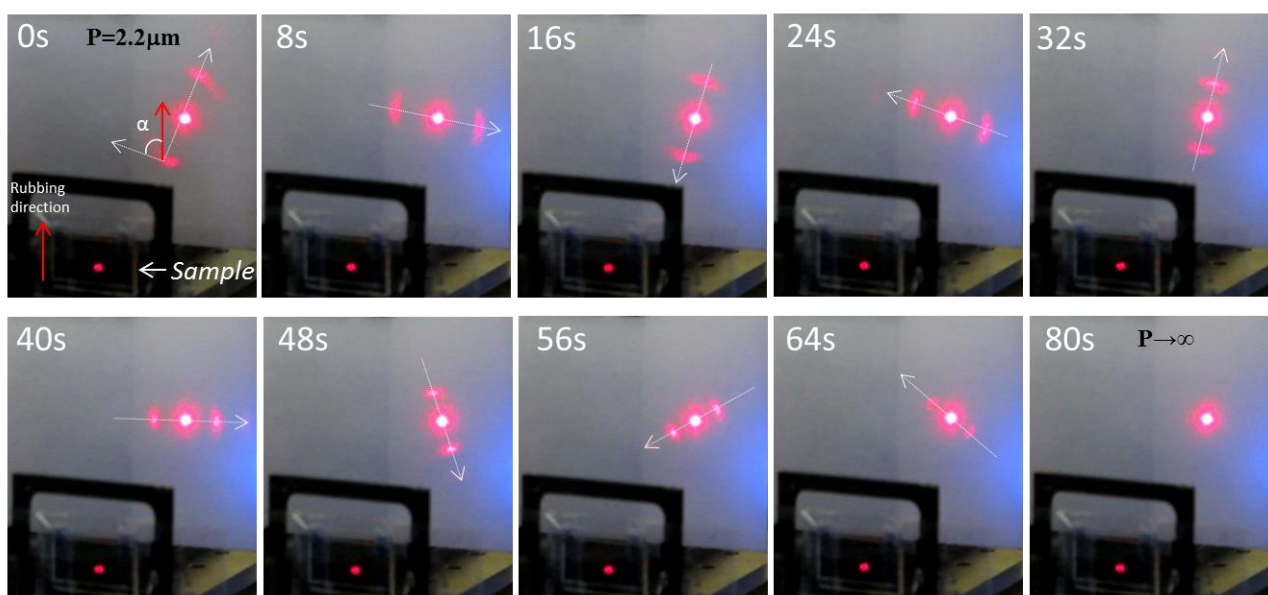


Рис. 4. Эволюция картины дифракции HeNe лазера на фоточувствительной холестерической ДР в ходе УФ облучения (время экспозиции указано на рис.)

Максимальный угол непрерывного вращения составил $\sim 690^\circ$, а полный поворот, вызванный УФ-светом, достигал $\sim 1220^\circ$. Кроме того, было продемонстрировано создание разнообразных сложноорганизованных структур при локальном и градиентном облучении образцов. Полученные ДР с быстро настраиваемым периодом и направлением ориентации представляют собой уникальный класс дифракционных оптических элементов.

2. ДР сформированные за счёт электроиндуцированного искажения холестерической спиральной структуры

Приложение переменного высокочастотного электрического поля к планарно-ориентированным слоям холестериков (рис. 5а) с положительной анизотропией диэлектрической проницаемости ($\Delta\epsilon > 0$) может привести к периодическому искажению структуры и формированию одно- или двумерных периодических структур [9]. Данный эффект связан с тем, что, с одной стороны, мезогенные группы стремятся изменить направление своей ориентации и повернуться в сторону направления электрического поля. С другой стороны, ориентирующее покрытие (например, натёртый полиимидный слой)

препятствует этой ориентации. В результате это может привести к периодическому искажению поля ЖК директора, как это показано на рис. 5б.

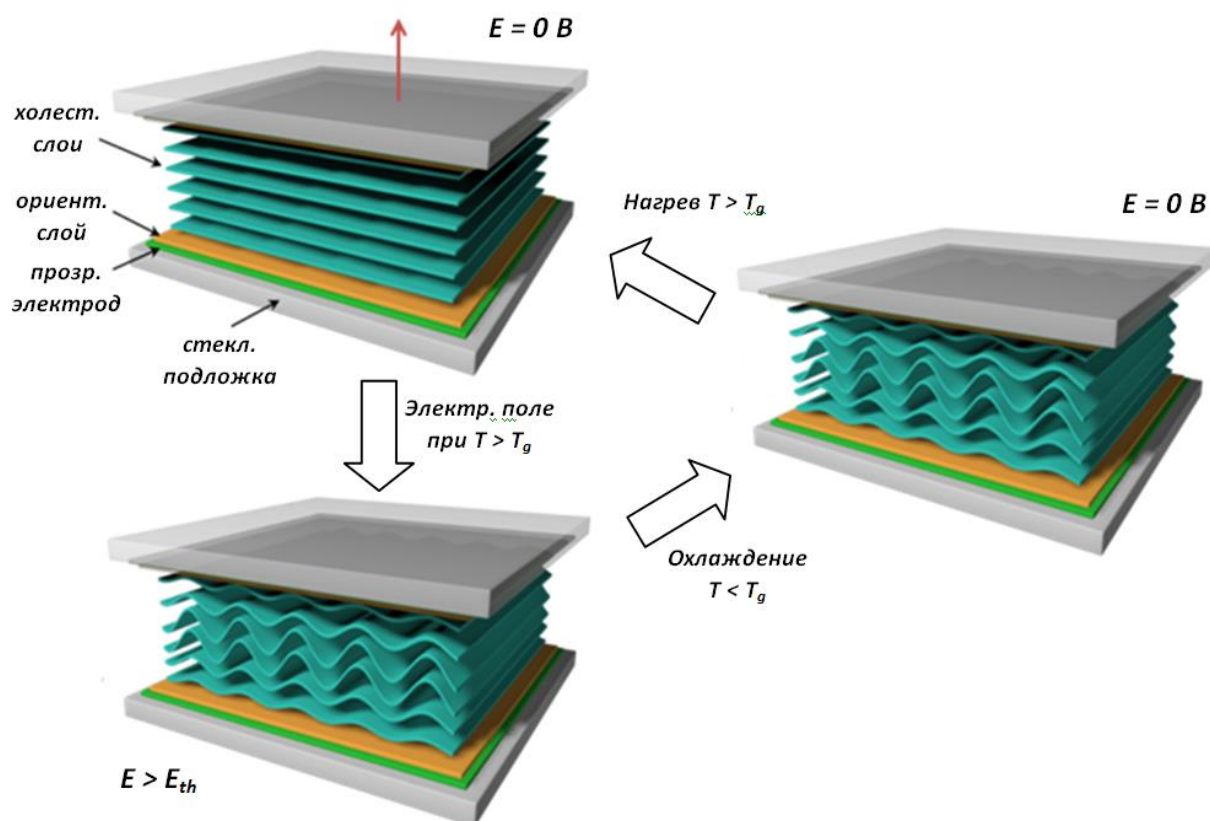


Рис. 5. Схематическое изображение последовательных этапов электроиндуцированного формирования полимерных холестерических ДР (подробности см. в тексте); T_g – температура стеклования полимерной смеси, E_{th} – пороговое напряжение формирования ДР

В работе [5] впервые этот эффект был использован для получения фотоуправляемых ДР на основе холестерической полимерной смеси с фоторегулируемым шагом спирали и, как следствие, величиной λ_{max} . В качестве материала была использована холестерическая смесь нематического полимера с небольшим количеством хирально-фотохромного допанта на основе коричной кислоты и изосорбида. ДР были получены приложением электрического поля к планарно-ориентированным холестерическим слоям (рис. 6).

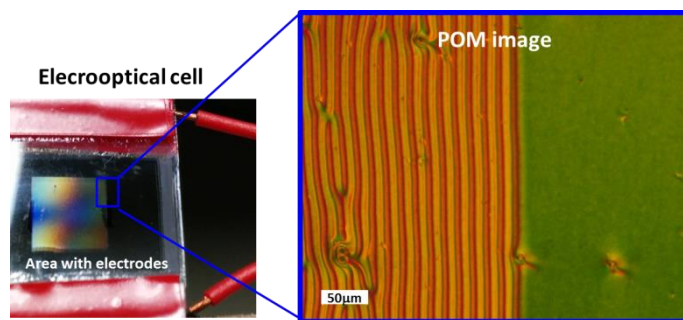


Рис. 6. Фотография электрооптической ячейки наполненной полимерной холестерической смесью с электроиндуцированной ДР (слева) и поляризационно-микроскопическое изображение ДР (справа)

Снижение закручивающей способности допанта при УФ-облучении смеси позволяет регулировать шаг холестерической спирали. В свою очередь, фотоконтроль шага спирали приводит к изменению параметров электроиндуцированных ДР, их периода и типа. В силу полимерной природы используемого материала электроиндуцированные решетки легко стабилизировать быстрым охлаждением образцов ниже температуры стеклования T_g и таким образом получить образец с «замороженной» фиксированной структурой (рис. 5). Отжиг при высоких температурах приводит к релаксации структуры ДР обратно к планарной. В исследованном полимерном материале реализованы все известные типы холестерических решеток: в частности, направление ДР может совпадать или быть перпендикулярным направлению натирания ориентирующего покрытия ячеек.

Было обнаружено, что свет с поляризацией, параллельной линиям ДР дифрагирует эффективнее, чем свет с перпендикулярной поляризацией, т.е. ДР являются поляризационно-чувствительными. Показано, что дифракционная эффективность определяется типом решетки и амплитудой приложенного электрического поля и может достигать ~80 %.

Важным преимуществом данных систем является то, что периодом ДР можно управлять с помощью УФ-облучения. Кроме того, была продемонстрирована возможность создания двумерных решеток (рис. 7). Таким образом, описанные полимерные системы и предложенный подход позволяют легко изготавливать разнообразные ДР с фоторегулируемыми параметрами.

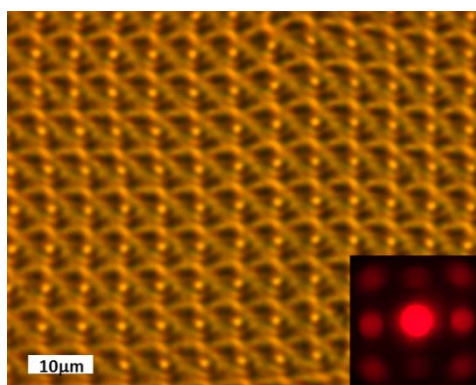


Рис. 7. Поляризационно-микроскопическое изображение двумерной ДР (на вставке картина дифракции HeNe лазера)

3. Фотозапись ДР за счёт раскрутки холестерической спирали

Использование хирально-фотохромных допантов для индуцирования холестерической фазы в ЖК полимерах позволяет использовать раскрутку холестерической спирали, сопровождающуюся сдвигом пика селективного отражения света, для записи поляризационно-чувствительных ДР без участия электрического поля.

В работе [7] для создания стабильных поляризационно-селективных решеток путем фоторегулирования шага спирали была приготовлена холестерическая смесь на основе нематического гребнеобразного ЖК полимера, допированного хирально-фотохромным соединением. E-Z фотоизомеризация молекул допанта приводит к снижению их закручивающей способности, раскрутке холестерической спирали, и, как следствие, сдвигу пика селективного отражения в длинноволновую область спектра.

Это позволило записать УФ-облучением с использованием масок (рис. 8а) поляризационные ДР, которые в значительной степени (почти 100%) избирательны к направлению круговой поляризации света (рис. 8б).

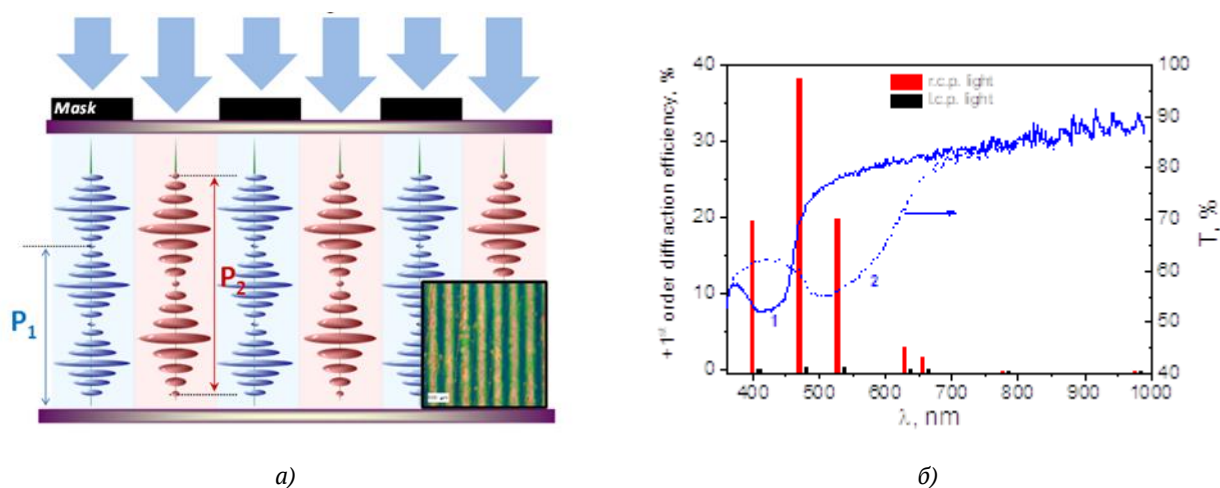


Рис. 8. (а) Схема записи ДР на плёнке фотохромной холестерической полимерной смеси под действием УФ облучения через маску; на вставке поляризационно-микроскопическое изображение текстуры сформированной ДР; P_1 и P_2 – шаг спирали холестерика до и после облучения. (б) Спектры пропускания T необлученной (1) и облученной (2) зон плёнки. Столбцы указывают соответствующую дифракционную эффективность для право- и левоциркулярно-поляризованного света (r.c.p. и l.c.p., соответственно).

Изученные полимерные плёнки образуют закрученную вправо спиральную структуру и, соответственно, в режиме пропускания ДР демонстрируют дифракцию только для правоциркулярно-поляризованного света. Полученные системы и предложенный подход получения ДР открывают интересные возможности для дальнейшей разработки материалов со стабильными ДР, работающими во всем видимом диапазоне спектра. Как положением, так и шириной спектрального диапазона эффективной дифракции можно легко управлять с помощью УФ-облучения и варьируемой концентрацией хирально-фотохромного допанта.

4. Фото- и электроактивные ДР полученные на основе нематических систем «темплатным» методом

Новым перспективным подходом к созданию фото- и электроуправляемых ДР на основе ЖК систем является использование так называемого «темплатного» метода. Этот метод включает в себя несколько стадий. Первый этап – фотополимеризация мезогенных моно- и диакрилатов введённых в низкомолекулярную ЖК-смесь в концентрации 10-30 вес%. Затем все низкомолекулярные компоненты удаляются растворением, а полученная пористая ЖК матрица перезаполняется фотохромной ЖК смесью. Данный способ получения частично сшитых ЖК композитов даёт важное преимущество, связанное с тем, что позволяет избежать конкуренции двух фотопроцесса – фотополимеризации и фотоизомеризации фотохромных компонентов композитов, как это было бы в случае обычного, одностадийного способа получения. Дело в том, что используемое для фотополимеризации УФ облучение чаще всего вызывает фотопроцессы в фотохромных молекулах, разрушая мезофазу. С другой стороны, доминирующее поглощение фотохромных молекул в УФ области значительно уменьшает скорость или делает невозможной реакцию полимеризации.

«Темплатный» метод активно используется разными научными группами, и в нашей недавней работе был использован для создания нового типа фото- и электроуправляемых ДР на основе ЖК систем [8]. Для этого в нематических ЖК смесях с $\Delta\varepsilon < 0$ полимеризацией моно- и диакрилатов осуществлена фиксация периодических диссипативных структур, полученных с помощью низкочастотного переменного электрического поля (50 Гц). Электрогидродинамическая (ЭГД) неустойчивость и конвекционное течение приводят к формированию двумерных ДР, которые затем фиксируются полимеризацией моно- и диакрилатов, входящих в состав нематической смеси (рис. 9).

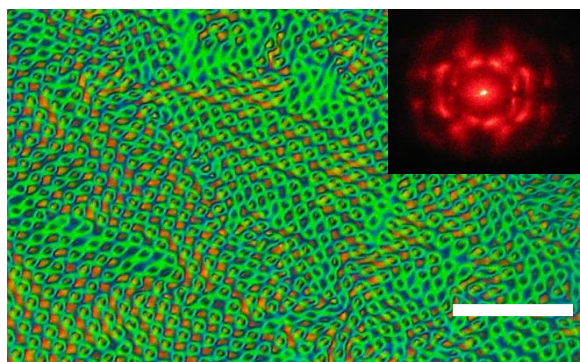


Рис. 9. Поляризационно-оптическая текстура ДР индуцированная ЭГД-эффектом в нематической ЖК смеси после фотополимеризации. Шкала 50 мкм. На вставке – картина дифракции HeNe лазера на данной структуре.

После растворения и удаления незаполимеризованных низкомолекулярных компонентов полученные пористые нематические сетки с фиксированными ДР заполняли нематической фотохромной азобензол-содержащей смесью. УФ-облучение вызывает E-Z-изомеризацию азобензол-содержащих молекул вызывая уменьшение двулучепреломления и,

следовательно, снижение дифракционной эффективности решетки. Этот эффект связан с образованием низкоанизотропных Z-изомеров, нарушающих ЖК-упорядочение. Этот эффект обратим и воздействие видимого света восстанавливает высокую концентрацию E-изомеров и значительно увеличивает эффективность дифракции. Аналогичное снижение дифракционной эффективности ДР наблюдается при воздействии высокочастотного переменного электрического поля (1 кГц), вызывающего ориентацию ЖК молекул вдоль его направления. Полученные фото- и электроуправляемые ДР представляют собой новый класс перспективных материалов для применения в фотонике и оптоэлектронике.

Заключение

В работе продемонстрированы различные подходы к формированию фото- и электропереключаемых одно- и двумерных периодических структур на основе ЖК систем. Сочетание ЖК упорядочения с легкостью управления молекулярным порядком и ориентацией делает полученные материалы и разработанные методы перспективными для создания дифракционных элементов для оптики и фотоники.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду (проект № 22-13-00055) за финансовую поддержку.

Список источников

- [1] **Ryabchun, A.** Cholesteric Liquid Crystal Materials for Tunable Diffractive Optics / A. Ryabchun, A. Bobrovsky // *Adv. Opt. Mater.* – 2018. – Vol. 6. - № 15. – 1800335. - DOI:10.1002/adom.201800335.
- [2] **Gao, K.** High-efficiency large-angle Pancharatnam phase deflector based on dual-twist design / K. Gao, C. McGinty, H. Payson, S. Berry, J. Vornehm, V. Finnemeyer, B. Roberts and P. Bos, // *Opt. Expr.* – 2017. – Vol. – 25. – P. 6283–6293. DOI: [10.1364/OE.25.006283](https://doi.org/10.1364/OE.25.006283).
- [3] **Lee, Y. H.** Optical properties of reflective liquid crystal polarization volume gratings / Y. H. Lee, Z. He and S. T. Wu, *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2019. – Vol. 36. – P. D9–D12. DOI: [10.1364/JOSAB.36.0000D9](https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.0000D9)
- [4] **Honma, M.** Liquid-Crystal Fresnel Zone Plate Fabricated by Microrubbing / M. Honma, Toshiaki Nose // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2005. – Vol. – 44. – P. 287. DOI:10.1143/JJAP.44.287.
- [5] **Ryabchun, A.** / Electroinduced Diffraction Gratings in Cholesteric Polymer with Phototunable Helix Pitch / A. Ryabchun, A. Bobrovsky, J. Stumpe, V. Shibaev, *Adv. Optical Mater.* – 2015. – Vol. – 3. – P. 1462–1469. DOI: 10.1002/adom.201500293.
- [6] **Ryabchun, A.** Rotatable Diffraction Gratings Based on Cholesteric Liquid Crystals with Phototunable Helix Pitch / A. Ryabchun, A. Bobrovsky, J. Stumpe, V. Shibaev // *Adv. Optical Mater.* – 2015. – Vol. – 3. – P. 1273–1279, DOI:10.1002/adom.201500159.
- [7] **Ryabchun, A.** Stable Selective Gratings in LC Polymer by Photoinduced Helix Pitch Modulation / A. Ryabchun, A. Bobrovsky, Y. Gritsai, O. Sakhno, V. Shibaev, J. Stumpe // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2015. – Vol. – 7. – P. 2554–2560, DOI:10.1021/am507499p
- [8] **Bobrovsky, A.** Photo- and electro-controllable 2D diffraction gratings prepared using electrohydrodynamic instability in nematic polymerizable mixture / A. Bobrovsky, V. Shibaev, B. Ostrovskii, M. Cigl, V. Hamplová, Alexej Bubnov // *J. Mater. Chem., in press.*

- [9] **Eelkema, R.** Rotational reorganization of doped cholesteric liquid crystalline films / R. Eelkema, M. Pollard, N. Katsonis, J. Vicario, D. Broer, B. Feringa // J. Am. Chem. Soc. – 2006. – Vol. – 128. - P. 14397. DOI:10.1021/ja065334o.

Photo- and electro-controlled diffractive optical elements based on liquid crystals

A.Yu. Bobrovsky, V.P. Shibaev

Faculty of Chemistry, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

One of the promising approaches to the creation of diffractive optical elements is the use of low molecular mass and polymer liquid crystal composites. These materials combine the optical properties of liquid crystals with the ability to fine-tune their properties by external influences such as an electric field and light, resulting in the formation of periodic diffractive structures. In this article, a brief mini-review of some principles for creating these periodic structures based on liquid crystalline low-molecular-mass and polymeric systems is presented, with a description of the main characteristics and advantages of the obtained materials.

Keywords: Liquid crystals, Liquid crystal polymers, Electro-optics Diffractive optical elements, Holography, Photochromism.

Обесцвечивание объемных голограмм на основе фото-термо-рефрактивного стекла: механизмы и применение

Н. В. Никоноров, А. И. Игнатъев, С. А. Иванов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла представляют собой среду для записи объемных голографических оптических элементов (ГОЭ), в которой под действием излучения и термообработки формируются металлические наночастицы (НЧ) серебра и оболочки в виде галогенидов серебра и фторида натрия. Одним из недостатков ФТР стекол, который ограничивает применение ГОЭ в видимом диапазоне, является широкая полоса поглощения НЧ серебра (400–460 нм). В работе предложена технология фотообесцвечивания ФТР стекол и ГОЭ на их основе. Показано, что воздействие импульсного лазерного излучения приводит к разрушению НЧ серебра до молекулярных кластеров и ионов серебра, при этом оболочки галогенидов серебра и фторида натрия сохраняются. Рассмотрены механизмы фотообесцвечивания и примеры использования обесцвеченных ГОЭ.

Ключевые слова: Фото-термо-рефрактивное стекло, Голографические оптические элементы, Фотодеструкция наночастиц серебра.

Цитирование: **Никоноров, Н. В.** Обесцвечивание объемных голограмм на основе фото-термо-рефрактивного стекла: механизмы и применение / Н. В. Никоноров, А. И. Игнатъев, С. А. Иванов // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 420–422.

Фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла – это новый класс фоточувствительных материалов, предназначенный для оптической записи информации и объемных фазовых голограмм [1]. В основе записи лежит технология фото-термо-индуцированной кристаллизации стекла, суть которой заключается в следующем. Под действием УФ излучения, длина волны которого совпадает с полосой поглощения церия в ФТР стекле образуются центры в виде кластеров серебра. Последующая термообработка приводит к формированию наночастиц (НЧ) серебра, росту на этих частицах оболочки в виде NaBr–AgBr (или NaCl–AgCl) и дальнейшему росту нанокристаллов NaF на этих оболочках. Поскольку в стекле выделяется фторсодержащая кристаллическая фаза, такие стекла называются «фторидными» ФТР стеклами. Разница в показателях преломления матрицы фторидного ФТР стекла и нанокристаллов NaF определяет изменение показателя преломления ($\Delta n \approx 10 \times 10^{-4}$), которое используется для записи объемных голограмм. Помимо «фторидных» ФТР стекол в университете ИТМО разработаны еще два класса ФТР стекол, в которых в процессе фото-термо-индуцированной кристаллизации выделяются нанокристаллы хлорида (AgCl) и бромида (AgBr) серебра в виде оболочек на серебряных НЧ [2, 3]. Соответственно, такие стекла называются «хлоридными» и «бромидными» ФТР стеклами.

Можно отметить следующие достоинства ФТР стекол и голограмм на их основе. Голограммы (в том числе, брэгговские решетки) могут быть записаны на большой глубине (до 10 мм). Записанные ГОЭ имеют высокую дифракционную эффективность (до 99,9 %), а также угловую (менее 0,1 мрад) и спектральную (менее 0,01 нм) селективность. Голограммы, записанные в ФТР стекле, обладают высокой химической устойчивостью, механической и термической прочностью, которые близки коммерческому оптическому стеклу К8

(зарубежный аналог BK7). Кроме того, они выдерживают воздействие мощного непрерывного и импульсного лазерного излучения. Пороги оптического пробоя ФТР стекла близки к порогам пробоя коммерческого оптического стекла К-8 (BK7): 30–40 Дж/см² при импульсном облучении (8 нс, $\lambda = 1064$ нм) и 100 кВт/см² при непрерывном облучении ($\lambda = 1095$ нм). Также стоит отметить, что голограммы могут выдерживать многократный нагрев до высоких температур (500 °С) без потери своих свойств.

У ФТР стекол есть также свои недостатки, которые ограничивают их широкое использование в фотонике и, соответственно, ставят задачи по совершенствованию их состава, технологии синтеза и оптической записи ГОЭ. Одним из таких недостатков является широкая полоса поглощения НЧ серебра (400–460 нм), которая ограничивает применение ГОЭ в видимом диапазоне. Настоящая работа ориентирована на решение этой проблемы. В университете ИТМО предложена технология для уменьшения оптических потерь во «фторидных», «хлоридных» и «бромидных» ФТР стеклах и ГОЭ на их основе. Поглощение наночастиц серебра во «фторидных», «бромидных» и «хлоридных» ФТР стеклах может быть значительно снижено за счет фотодеструкции, включающей фоторагментацию и фотоионизацию серебряных наночастиц, например, при облучении второй гармоникой (532 нм) импульсного неодимового лазера, которое попадает в край полосы поглощения серебряных наночастиц. Также серебряные наночастицы могут быть разрушены в результате фотоионизации в сильном электромагнитном поле фемтосекундного лазерного импульса. Следует отметить, что при лазерном воздействии разрушаются только серебряные наночастицы, а нанокристаллы NaF оболочки AgCl и AgBr сохраняются.

Основные механизмы разрушения серебряных НЧ под воздействием импульсного лазера — это нагрев НЧ серебра за счет поглощения падающего излучения и «кулоновский взрыв» в результате фотоионизации в сильном электромагнитном поле. Обнаружено влияние оболочек AgCl и AgBr на процессы обесцвечивания. Так, установлено, что для разрушения НЧ серебра в ФТР стекле (только ядра) требуется существенно большие дозы облучения (400×10^2 Дж/см²) по сравнению с дозами для разрушения НЧ серебра в оболочках (6×10^2 Дж/см²).

Также обнаружен реверсивный эффект, т.е. нагрев ФТР стекла после обесцвечивания приводит к агрегации мелких фрагментов НЧ и кластеров серебра в более крупные НЧ и, соответственно, росту полосы поглощения плазмонного резонанса. Однако полоса поглощения НЧ серебра восстанавливается не полностью. Полное восстановление полосы происходит только после УФ облучения и последующей термообработки. Это свидетельствует о том, что при фотодеструкции НЧ серебра под действием импульсного лазерного излучения происходит не только процесс фотофрагментации, но и фотоионизации.

Следует также отметить, что реверсивный процесс в случае с НЧ серебра, окруженными оболочками AgCl и AgBr, происходит в разы быстрее, чем в случае НЧ без оболочек.

Технология обесцвечивания позволяет преобразовывать амплитудно-фазовые брэгговские решетки в фазовые, а также уменьшить нагрев ГОЭ при работе с мощными лазерными пучками и, соответственно, уменьшить сдвиг контура угловой и спектральной селективности брэгговских решеток.

Список источников

- [1] **Никонов, Н.В.** Фототерморелактивное стекло - перспективный материал фотоники (обзор) / Н. В. Никонов, С. А. Иванов, Е. С. Мусихина // Оптический журнал. — 2023. — Том 90. — №3. — С. 68–100.

- [2] **Dubrovin, V.** Bromide photo-thermo-refractive glass for volume Bragg gratings and waveguide structure recording / V. Dubrovin, N. Nikonorov, A. Ignatiev // *Optical Materials Express*. — 2017. — Vol.7. — № 7. — P. 2280–2292.
- [3] **Klyukin, D.** Volume Bragg gratings in chloride photo-thermo-refractive glass after femtosecond laser bleaching / D. Klyukin, V. Krykova, S. Ivanov, P. Obraztsov, M. Silvennoinen, N. Nikonorov // *Optical Materials Express*. — 2017. — Vol.7. — № 11. — P. 4131–4137.

Bleaching volume holograms based on photo-thermo-refractive glass: mechanisms and application

N. V. Nikonorov, A. I. Ignatiev, S. A. Ivanov

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

Photo-thermo-refractive (PTR) glasses are a medium for recording volume holographic optical elements (HOE), in which, under the UV radiation and subsequent heat treatment, metallic silver nanoparticles (NPs) and shells in the form of silver halides and sodium fluoride are formed. One of the drawbacks of PTR glasses, which limits the use of HOE in the visible range, is the wide absorption band of silver NPs (400–460 nm). A technology for bleaching of PTR glasses and HOEs based on them was proposed. It is shown that the impact of pulsed laser radiation leads to the destruction of silver NPs down to molecular clusters and silver ions, while the shells of silver halides and sodium fluoride are preserved. The mechanisms of photobleaching and examples of the bleached HOEs applications are considered.

Keywords: Photo-thermo-refractive glass, Holographic optical elements, Photodestruction of silver nanoparticles.

Технология Na^+ - Ag^+ ионного обмена в матрице фото-термо-рефрактивного стекла для различных применений фотоники

Е. М. Сгибнев¹, А. В. Шелаев¹, Н. В. Никоноров², А. В. Барышев¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследуется влияние добавок в составе фото-термо-рефрактивного (ФТР) стекла на спектральные и оптические свойства наностеклокерамик, полученных методом Na^+ - Ag^+ ионного обмена с последующей термообработкой. В матрице ФТР стекла без добавок происходит формирование nanoостровковой плёнки серебра. Ионы переменной валентности, церий и сурьма, восстанавливают ионы серебра, что приводит к формированию люминесцентных кластеров серебра или наночастиц в зависимости от температуры термообработки. При введении галогенидов в состав ФТР стекла наблюдается образование нанокристаллов галогенида серебра AgBr или при совместном введении поливалентных ионов наноструктур типа ядро-оболочка Ag-AgBr . В работе обсуждаются применения разработанных наностеклокерамик для различных применений фотоники, включая твердотельные люминофоры, фотохромные материалы, оптические сенсоры и фотокатализ.

Ключевые слова: Фото-термо-рефрактивное стекло, Ионный обмен, Серебряные наноструктуры.

Цитирование: Сгибнев, Е. М. Технология Na^+ - Ag^+ ионного обмена в матрице фото-термо-рефрактивного стекла для различных применений фотоники / Е. М. Сгибнев, А. В. Шелаев, Н. В. Никоноров, А. В. Барышев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 423–425.

Оптическое материаловедение в настоящее время развивается в сторону создания полифункциональных материалов на основе наноструктурированных стеклокерамик. Одним из таких материалов является фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло, разработанное для записи объёмных фазовых голограмм, в котором под действием УФ излучения и последующей термической обработки последовательно происходит формирование наночастиц серебра, образование галогенидной оболочки и рост кристаллической фазы NaF [1]. ФТР стекло может использоваться в качестве регистрирующей, активной [2] и фотоструктурируемой [3] сред для записи голограмм, лазерной генерации и создания микрофлюидных структур соответственно. Наличие в составе ФТР стекла щелочных ионов позволяет использовать технологию ионного обмена для создания волноводных структур. Однако, на сегодняшний день остаётся неизученным вопрос о влиянии малых добавок (церий, сурьмы, галогениды), определяющих функционал ФТР стекла, на его спектральные и оптические свойства после Na^+ - Ag^+ ионного обмена.

В работе исследовалась матрица ФТР стекла на основе системы $\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO-SiO}_2\text{-F}$ синтезированное при $1500\text{ }^\circ\text{C}$ в воздушной атмосфере воздуха с использованием платинового тигля и мешалки. Также были синтезированы и исследованы стёкла, активированные CeO_2 ,

Sb_2O_3 и NaBr . $\text{Na}^+\text{-Ag}^+$ ионный обмен (ИО) проводился методом погружения образцов стекла в расплав нитратов серебра и натрия (5мол.% AgNO_3 /95мол.% NaNO_3) при 320 °С. После процесса ИО образцы подвергались термической обработке при температурах 300-500 °С для формирования серебряных наноструктур.

$\text{Na}^+\text{-Ag}^+$ ИО в матрице ФТР стекла приводит к длинноволновому сдвигу края УФ поглощения обусловленному поглощением внедрённых ионов Ag^+ . После термической обработки наблюдалась обратная диффузия серебра с формированием нанострочковой плёнки серебра на поверхности стекла. Оптическими свойствами таких плёнок можно управлять в широких пределах, варьируя температуру и длительность обработки. В работе продемонстрировано, что после механического удаления плёнки серебра, возможно повторно её сформировать, что открывает перспективы создания эффективных и многоцветных подложек для сенсоров на основе явления гигантского комбинационного рассеяния (ГКР).

В стёклах, легированных церием или сурьмой, вследствие окислительно-восстановительных реакций происходит восстановление серебра с последующей агрегацией в молекулярные кластеры или наночастицы в зависимости от температуры отжига. Так, обработка при температурах ниже температуры стеклования ($T_g \approx 470$ °С) приводит к формированию люминесцентных кластеров серебра, характеризующихся белым свечением и абсолютным квантовым выходом фотолюминесценции до 65% при УФ возбуждении. Стёкла с кластерами серебра могут использоваться в качестве люминофоров для белых светодиодов, конвертеров УФ излучения для фотовольтаики, сред для записи и хранения информации. При более высоких температурах отжига наблюдается формирование наночастиц серебра, характеризующихся локализованным плазмонным резонансом. При химическом травлении верхнего слоя стекла, закрывающего наночастицы, такие подложки также могут быть использованы для сенсоров на основе ГКР [4].

Введение бромидов в матрицу ФТР стекла при $\text{Na}^+\text{-Ag}^+$ ИО с последующей термообработкой при температуре выше температуры стеклования приводит к формированию в ионообменном слое нанокристаллов AgBr в случае. Наличие полупроводниковых нанокристаллов AgBr в стеклянной матрице позволяет использовать такие наностеклокерамики в качестве фото- и термохромных материалов, например для датчиков температуры.

Кроме того, одновременное введение в состав стекла ионов переменной валентности и бромидов приводит к формированию сложных наноструктур типа ядро-оболочка Ag-AgBr . Такие гибридные наноструктуры металл-полупроводник широко применяются в фотокатализе. Полученные результаты показывают, что фотокаталитическая активность стеклокерамик с наноструктурами металл-полупроводник позволяет в 24 и 12 раз повысить скорость разложения красителя метиленовый оранжевый под действием УФ излучения по сравнению со стеклокерамиками, содержащими Ag наночастицы и AgBr нанокристаллы соответственно.

Таким образом, в работе продемонстрировано, что малые добавки, характерные для ФТР стекла, играют ключевую роль в формировании серебряных наноструктур при использовании технологии $\text{Na}^+\text{-Ag}^+$ ионного обмена и определяют функциональность стеклокерамик. Показано, что полученные наноструктуры в стеклокерамиках обладают люминесцентными, плазмонными, термохромными и фотокаталитическими свойствами и могут найти применения в качестве люминофоров, КТР сенсоров, датчиков температуры и фотокатализаторов.

Список источников

- [1] **Никоноров, Н. В.** Фототермо-рефрактивное стекло–перспективный материал фотоники(обзор) / Н. В. Никоноров, С. А. Иванов, Е. С. Мусихина // Оптический журнал. — 2023. — Том 90. — № 3. — С. 68–100.
- [2] **Nasser, K.** Spectroscopic and laser properties of erbium and ytterbium co-doped photo-thermo-refractive glass / K. Nasser, V. Aseev, S. Ivanov, A. Ignatiev, N. Nikonorov // Ceramics International. — 2020. — Vol 46. — № 16. — P. 26282–26288.
- [3] **Sgibnev, Y.** Photostructurable photo-thermo-refractive glass / Y. Sgibnev, N. Nikonorov, A. Ignatiev, V. Vasilyev, M. Sorokina // Optics Express. — 2016. — Vol 24. — № 5. — P. 4563–4572.
- [4] **Chen, Y.** Ag nanoparticles embedded in glass by two-step ion exchange and their SERS application / Y. Chen, L. Karvonen, A. Saynatjoki, C. Ye, A. Tervonen, S. Honkanen // Optical Materials Express. — 2011. — Vol 1. — № 2. — P. 164–172.

$\text{Na}^+\text{-Ag}^+$ ion exchange technology in photo-thermo-refractive glass matrix for various photonic applications

Y. M. Sgibnev¹, A. V. Shelaev¹, N. V. Nikonorov², A. V. Baryshev¹

¹ Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

² ITMO University, St Petersburg, Russia

In this study the influence of small additives of photo-thermo-refractive (PTR) glass on spectral and optical properties of $\text{Na}^+\text{-Ag}^+$ ion-exchanged and heat-treated glassceramics is presented. Formation of nanoisland silver films was observed for PTR matrix with no dopants. Polyvalent ions, cerium and antimony, reduced embedded silver ions, which led to formation of luminescent silver clusters or nanoparticles depending on heat treatment temperature. Presence of halogenides in PTR glass composition resulted to growth of AgBr nanocrystals or core-shell nanostructures Ag-AgBr in case of polyvalent ions codoping. Potential applications of the developed nanoglassceramics for photonics including including solid-state lighting, photochromic materials, optical sensors, and photocatalysis were discussed.

Keywords: Photo-thermo-refractive glass, Ion exchange, Silver nanostructures.

Температурные зависимости эффектов дифракции света на регулярных доменных структурах в кристаллах танталата лития

С. М. Шандаров¹, А. В. Дубиков¹, Е. Н. Савченков¹, Д. А. Горбунова¹, М. А. Федянина¹, Н. И. Буримов¹, А. Р. Ахматханов², М. А. Чувакова², В. Я. Шур²

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

² Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Представлены результаты исследования температурных зависимостей эффектов изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на регулярной доменной структуре с периодом 7,99 мкм, созданной в стехиометрическом кристалле 1%MgO:LiTaO₃ переключением поляризации в пространственно-периодическом поле. В температурном диапазоне от 10 до 110 °С, включающем изотропную точку при $T_i = 66$ °С, наблюдались различные вырожденные варианты, при которых реализуется дифракция Брэгга с двумя и тремя дифракционными максимумами с эффективностью, достигающей около 0,4 %.

Ключевые слова: регулярная доменная структура, дифракция Брэгга, анизотропная дифракция, танталат лития.

Цитирование: Шандаров, С. М. Температурные зависимости эффектов дифракции света на регулярных доменных структурах в кристаллах танталата лития / С. М. Шандаров, А. В. Дубиков, Е. Н. Савченков, Д. А. Горбунова, М. А. Федянина, Н. И. Буримов, А. Р. Ахматханов, М. А. Чувакова, В. Я. Шур // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 426–434.

Введение

Современный уровень развития доменной инженерии [1–4] позволяет создавать в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития, танталата лития и титанил-фосфата калия и в тонкопленочных структурах на их основе регулярные доменные структуры (РДС), используемые для устройств квазисинхронного спектрального преобразования лазерного излучения и его электрооптической модуляции [5–10]. Дифракция света на доменных стенках РДС может быть использована, во-первых, для контроля их качества [11, 12], а во-вторых, влияет на амплитудные характеристики и величину нелинейных искажений при электрооптической модуляции лазерного излучения [8, 9]. Наряду с брэгговской дифракцией изотропного типа на доменных стенках РДС, проявляющейся при такой модуляции, для периодически поляризованных кристаллов ниобата лития (PPLN) и танталата лития (PPLT) наблюдалась и анизотропная дифракция Брэгга [12–14]. Температурные зависимости обыкновенного и необыкновенного показателей преломления для PPLN и PPLT необходимо учитывать как при реализации эффектов квазисинхронизма, так и при анализе условий Брэгга для осуществления электрооптической модуляции. Для этого принято использовать соответствующие уравнения Зелмеера (см., например, [15–17]), которые не всегда точно описывают показатели преломления для реальных образцов PPLN и PPLT.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование температурных зависимостей для различных эффектов при изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на РДС с периодом $\Lambda = 7,99$ мкм, созданной в стехиометрическом кристалле $1\%MgO:LiTaO_3$ переключением поляризации в пространственно-периодическом поле, в диапазоне от 10 до 110 °С. Получено, что ниже изотропной точки $T_i = 66$ °С для необыкновенного (e) зондирующего пучка с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм эффект вырождения, при котором одновременно наблюдается как изотропный, так и анизотропный виды дифракции, имеет место при температуре $T_{deo} = 10,5$ °С. Вырожденная анизотропная дифракция с двумя дифракционными максимумами типа $e-o$ наблюдалась при температуре $T_{deo} = 41,5$ °С; подобная же дифракция при обыкновенном (o) зондирующем пучке типа $o-e$ имела место при $T_{doe} = 91$ °С. Выше изотропной точки, при $T_{doe} = 107,5$ °С, наблюдалась дифракция из обыкновенного зондирующего пучка в максимумы с обыкновенным и необыкновенным состояниями поляризации.

Методика эксперимента

В экспериментах исследовалась РДС с пространственным периодом $\Lambda = 7,99$ мкм, сформированная в ООО «Лабфер» электрической переполяризацией в образце $1\%MgO:LiTaO_3$, имеющем размеры $6 \times 2 \times 1$ мм³ вдоль осей X, Y и Z, соответственно. Переполяризованные области кристалла имели ненаклонные границы (доменные стенки Y-типа), перпендикулярные кристаллографической оси X и полностью соответствующие его поперечному сечению.

Для наблюдения влияния температуры на эффекты изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС использовалась экспериментальная установка, схема которой иллюстрируется рис. 1.

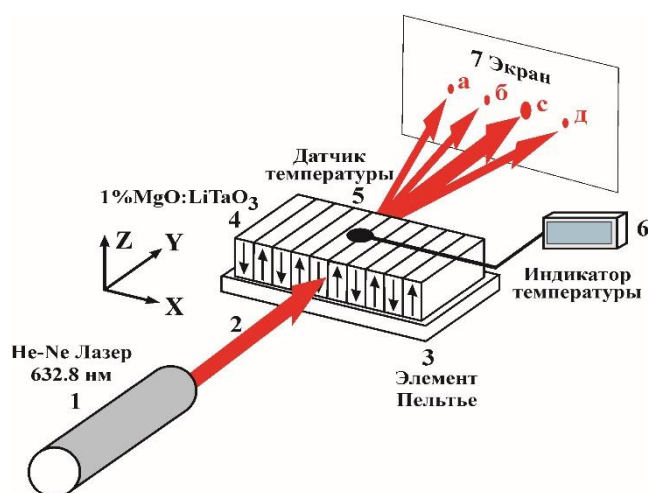


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования температурных зависимостей различных эффектов, наблюдаемых при изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС в кристалле $1\%MgO:LiTaO_3$.

Изменение и контроль температуры образца с РДС 4 осуществлялось с помощью элемента Пельтье 3, датчика 5 и индикатора температуры 6, подключенных к программируемому блоку управления. Он позволял задавать температуру в диапазоне от 10 до 110 °С и поддерживать ее с точностью $\pm 0,2$ °С. Для точной подстройки по углу Брэгга относительно зондирующего светового пучка 2, распространяющегося в плоскости XU кристалла при наблюдении различных дифракционных процессов, образец с элементом Пельтье устанавливался на прецизионном поворотном столике. Зондирующий гауссов пучок 2 от He-Ne лазера 1 с длиной волны $\lambda = 632.8$ нм, выходной мощностью 22,5 мВт и вектором поляризации, ориентированным вдоль оси Z или в плоскости XU , фокусировался сферической или цилиндрической линзой на середину входной грани образца $y = 0$. Для определения эффективности дифракции использовался измеритель мощности THORLABS-100D. Качественный вид наблюдаемых картин дифракции в дальней зоне фиксировался на экране 7, расположенном на расстоянии $L = 1$ м от кристалла, визуально и с помощью цифровой фотокамеры.

Проведенные эксперименты показали, что для исследуемого кристалла $1\%MgO:LiTaO_3$ при температуре $T_i = 66$ °С наблюдается изотропная точка, при которой показатели преломления для обыкновенных и необыкновенных волн становятся равными друг другу: $n_o(T_i) = n_e(T_i)$. Кроме того, наряду с обычными вариантами изотропной и анизотропной дифракции Брэгга различных порядков, подробно описанных в работах [8, 9, 12–14], на определенных температурах наблюдались картины дифракции вырожденных типов, когда на экране 7 одновременно присутствовали 2 или 3 брэгговских максимума. Следует отметить, что вырожденная анизотропная дифракция Брэгга с двумя максимумами наблюдалась ранее при акустооптическом взаимодействии на фиксированных частотах акустических волн, возбуждаемых в одноосных кристаллах [18]. Подробное описание наблюдаемых процессов вырожденных вариантов дифракции на доменных стенках РДС в кристалле $1\%MgO:LiTaO_3$ представлено ниже.

Вырожденная дифракция Брэгга на доменных стенках РДС

Векторные диаграммы для вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга на РДС, аналогичные наблюдаемым при акустооптическом взаимодействии в одноосных кристаллах [18], представлены на рис. 2.

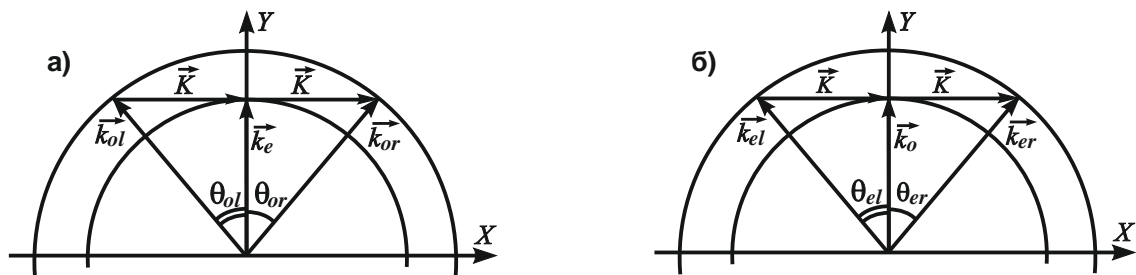


Рис. 2. Векторные диаграммы вырожденной анизотропной дифракции Брэгга на РДС в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ при температуре $T_1 = 41,5$ °C ниже изотропной точки, для необыкновенного (e) зондирующего пучка (а) и при $T_2 = 91$ °C выше нее, для обыкновенного (o) зондирующего пучка (б).

Такой вид дифракции Брэгга наблюдался при двух температурах образца, $T_1 = 41,5$ °C (рис. 2а) и $T_2 = 91$ °C (рис. 2б). В первом случае, при $n_o(T_1) > n_e(T_1)$, использовался необыкновенный зондирующий пучок с волновым вектором \vec{k}_e , с высокой точностью ориентированный ортогонально к вектору решетки РДС \vec{K} , а дифрагированные обыкновенные пучки с волновыми векторами \vec{k}_{ol} и \vec{k}_{or} имели симметричное угловое положение ($\theta_{ol} = \theta_{or}$) относительно \vec{k}_e . Наблюдаемая при этом на экране 7 (см. рис. 1) дифракционная картина иллюстрируется рис. 3.

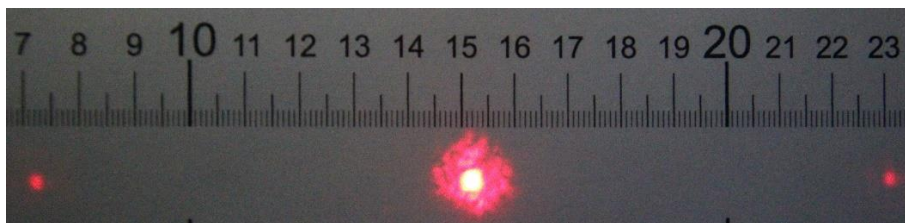


Рис. 3. Картина в дальней зоне для вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС ($\Lambda = 7,99$ мкм) в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ при температуре $T_1 = 41,5$ °C и необыкновенном зондирующем пучке, соответствующая векторной диаграмме, показанной на рис. 2а

Во втором случае ($T_2 = 91$ °C) для наблюдения вырожденной дифракции аналогичного типа, при $n_o(T_2) < n_e(T_2)$, использовался обыкновенный зондирующий пучок с волновым вектором \vec{k}_o , порождавший дифрагированные необыкновенные пучки с волновыми векторами \vec{k}_{el} и \vec{k}_{er} (см. рис. 2б). Представленная на рис. 4 дифракционная картина, наблюдаемая при данной температуре, показывает, что углы между зондирующими и дифрагированными пучками в воздухе θ_{dif}^{air} при температурах T_1 и T_2 совпадают с высокой точностью и равны 0,079 рад (4,53 угл. град.).

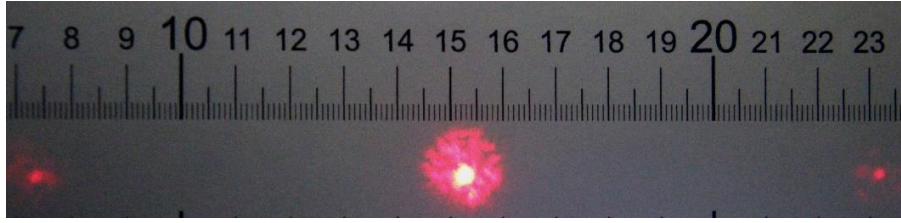


Рис. 4. Картина в дальней зоне для вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС ($\Lambda = 7,99$ мкм) в кристалле $1\% \text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ при температуре $T_2 = 91$ °С и обыкновенном зондирующем пучке, соответствующая векторной диаграмме, показанной на рис. 2б.

Из иллюстрируемых рис. 2 векторных диаграмм легко показать, что углы дифракции $\theta_{dif}^{air}(T_1)$ и $\theta_{dif}^{air}(T_2)$ равны друг другу и определяются соотношениями

$$\sin[\theta_{dif}^{air}(T_1)] = \frac{\lambda}{\Lambda} = \sqrt{n_o^2(T_1) - n_e^2(T_1)}, \quad \sin[\theta_{dif}^{air}(T_2)] = \frac{\lambda}{\Lambda} = \sqrt{n_e^2(T_2) - n_o^2(T_2)}. \quad (1)$$

Отсюда следует, что экспериментальные данные для углов между зондирующими и дифрагированными пучками в воздухе хорошо согласуются с расчетным значением $\theta_{dif}^{air}(T_1) = \theta_{dif}^{air}(T_2) = \arcsin(\lambda / \Lambda) = 0,0792$ рад, а разность квадратов показателей преломления кристалла $1\% \text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ на длине волны $\lambda = 632,8$ нм при температурах T_1 и T_2 , соответствующих реализации вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга на РДС с периодом $\Lambda = 7,99$ мкм, может быть оценена как $n_o^2(T_1) - n_e^2(T_1) = n_e^2(T_2) - n_o^2(T_2) = 6,27 \cdot 10^{-3}$. Измерения эффективности такой вырожденной дифракции показали, что в максимуме она достигает значений $\eta_m \approx 0,4$ %.

Кроме подробно рассмотренной выше вырожденной чисто анизотропной дифракции Брэгга, экспериментально наблюдался и другой тип вырожденного взаимодействия, не имеющий аналогов с известными из [18] акустооптическими вариантами и характеризующийся тремя максимумами, сопровождающими зондирующий пучок. Соответствующая ему векторная диаграмма, реализуемая при температуре кристалла $T_3 = 10,5$ °С для необыкновенного зондирующего пучка с волновым вектором \vec{k}_e , иллюстрируется рис. 5.

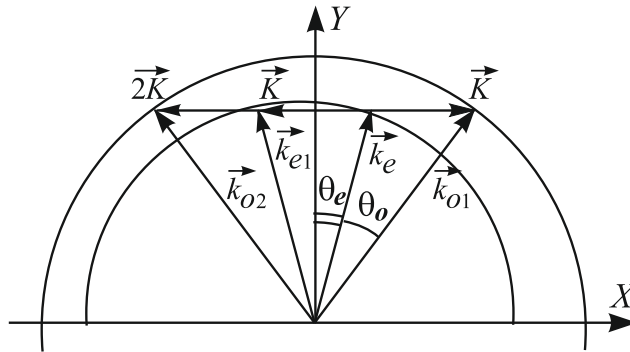


Рис. 5. Векторная диаграмма вырожденной дифракции Брэгга на РДС в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ при температуре $T_3 = 10,5$ °С, происходящая из необыкновенного зондирующего пучка в максимумы с обыкновенными и необыкновенными состояниями поляризации. θ_e – угол между волновым вектором зондирующего пучка и осью Y кристалла; θ_o – угол отклонения от зондирующего пучка для обыкновенного пучка, дифрагированного в первый порядок.

При данной температуре ($T_3 < T_i$, $n_o(T_3) > n_e(T_3)$) условия дифракции Брэгга в первый порядок на составляющей возмущений оптических свойств доменными стенками РДС с волновым вектором \vec{K} удовлетворяются одновременно для необыкновенного и обыкновенного пучков с волновыми векторами \vec{k}_{o1} (изотропная дифракция) и \vec{k}_{e1} (анизотропный процесс) соответственно. Кроме этого, здесь удовлетворяются условия Брэгга для анизотропной дифракции во второй порядок на создаваемых РДС возмущениях с вектором $2\vec{K}$, при которой рождается обыкновенный пучок с волновым вектором \vec{k}_{o2} . Наблюдаемая на экране 7 при таких процессах дифракционная картина (см. рис. 1) иллюстрируется рис. 6.

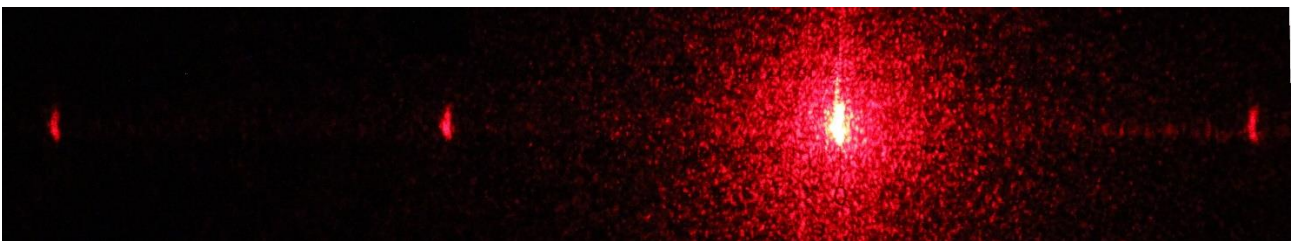


Рис. 6. Картина в дальней зоне для вырожденной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС ($\Lambda = 7,99$ мкм) с тремя максимумами, сопровождающими необыкновенный зондирующий пучок, в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ при температуре $T_3 = 10,5$ °С, соответствующая векторной диаграмме, показанной на рис. 5. Световые пучки справа налево: обыкновенный пучок (анизотропная дифракция первого порядка с эффективностью $\eta \approx 0,11\%$); необыкновенный зондирующий пучок; необыкновенный пучок (изотропная дифракция первого порядка, $\eta \approx 0,08\%$); обыкновенный пучок (анизотропная дифракция второго порядка, $\eta \approx 0,22\%$).

Для температуры кристалла $T_4 = 107,5$ °С ($T_4 > T_i$, $n_o(T_4) < n_e(T_4)$) подобный вид дифракции наблюдался при обыкновенном зондирующем пучке; в этом случае поляризация всех дифрагированных пучков изменялась на ортогональную.

Используя представленные на рис. 5 векторные диаграммы, можно найти разности квадратов показателей преломления кристалла 1%MgO:LiTaO₃ на длине волны $\lambda = 632,8$ нм при температурах T_3 и T_4 в следующем виде:

$$n_o^2(T_3) - n_e^2(T_3) = n_e^2(T_4) - n_o^2(T_4) = 2 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 = 1,254 \cdot 10^{-2}. \quad (2)$$

Полученные соотношения для разности квадратов показателей преломления кристалла танталата лития при температурах, соответствующих четырем вариантам вырожденной дифракции Брэгга на доменных стенках, созданной в нем РДС, могут быть использованы для экспериментального уточнения данных материальных параметров.

Заключение

Таким образом, исследованы температурные зависимости эффектов изотропной и анизотропной дифракции Брэгга на доменных стенках РДС с пространственным периодом 7,99 мкм, созданной в стехиометрическом кристалле 1%MgO:LiTaO₃ переключением поляризации в пространственно-периодическом поле. Для исследованного температурного диапазона от 10 до 110 °С получено, что ниже изотропной точки $T_i = 66$ °С для необыкновенного зондирующего пучка с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм эффект вырождения, при котором одновременно наблюдается как изотропный, так и анизотропный виды дифракции, имеет место при температуре $T_{deo} = T_3 = 10,5$ °С. Вырожденная анизотропная дифракция с двумя дифракционными максимумами типа $e-o$ наблюдалась при температуре $T_{deo} = T_1 = 41$ °С; подобная же дифракция типа $o-e$ при обыкновенном зондирующем пучке имела место при $T_{doe} = T_2 = 91$ °С. Выше изотропной точки, при $T_{dooe} = T_4 = 107,5$ °С, наблюдалась дифракция из обыкновенного зондирующего пучка в максимумы с обыкновенным и необыкновенным состояниями поляризации.

Получены соотношения для разности квадратов показателей преломления кристалла танталата лития при температурах, соответствующих всем четырем вариантам вырожденной дифракции Брэгга. Найденные для них экспериментальные значения углов между зондирующими и дифрагированными пучками в воздухе хорошо согласуются с результатами проведенных расчетов.

Благодарность

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023-2025 годы (задание FEWM-2023-0012).

Список источников

- [1] **Крутов, В. В.** Технология формирования сегнетоэлектрических регулярных доменных структур с использованием интерферирующих упругих волн / В. В. Крутов, А.С. Сигов // Russian Technological Journal. — 2022. — Т. 10. — №. 5. — С. 73–91.
- [2] **Шур, В. Я.** Доменная нанотехнология в монокристаллах семейства ниобата лития и танталата лития / В. Я. Шур // Наноматериалы и наноструктуры-XXI век. — 2015. — Т. 6. — №. 2. — С. 38–45.
- [3] **Shur, V. Ya.** Micro- and nano-domain engineering in lithium niobate / V. Ya. Shur, A. R. Akhmatkhanov, I. S. Baturin // Appl. Phys. Rev. — 2015. — Vol. 2. — P. 040604.
- [4] **Sun, D.** Microstructure and domain engineering of lithium niobate crystal films for integrated photonic applications / D. Sun, Y. Zhang, D. Wang et al. // Light: Science & Applications. — 2020. — Т. 9. — №. 1. — P. 197.
- [5] **Ferrari, P.** Ferroelectric crystals for photonic applications / P. Ferrari, S. Grilli, P. De Natale. (Eds.) — Berlin–Heidelberg: Springer–Verlag, 2009, 2014. — 493 p.
- [6] **Inoue, T.** Electrooptic Bragg deflection modulator using periodically poled MgO : LiNbO₃ / T. Inoue, T. Suhara. // IEEE Photon. Technol. Lett. — 2011. — V. 23, No. 17. — P. 1252–1254.
- [7] **Mhaouech, I.** Low drive voltage electro-optic Bragg deflector using a periodically poled lithium niobate planar waveguide / I. Mhaouech, V. Coda, G. Montemezzani, M. Chauvet, L. Guilbert // Opt. Lett. — 2016. — Vol 41. — No. 18. — P. 4174–4177.
- [8] **Shandarov, S. M.** Electrically controllable diffraction of light on periodic domain structures in ferroelectric crystals / S. M. Shandarov, E. N. Savchenkov, M. V. Borodin, A. E. Mandel, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // Ferroelectrics. — 2019. — Vol. 542. — P. 58–63.
- [9] **Шандаров, С. М.** Электрически управляемая дифракция света на периодических доменных структурах в сегнетоэлектрических кристаллах / С. М. Шандаров, Е. Н. Савчнков, М. В. Бородин, А. Е. Мандель, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // HOLOEXPO 2018: XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 66–70.
- [10] **Wang, T. J.** Electro-optically spectrum switchable, multiwavelength optical parametric oscillators based on aperiodically poled lithium niobate / T. J. Wang, L. M. Deng, H. P. Chung, W. K. Chang, T. D. Pham, Q. H. Tseng, R. Geiss, T. Pertsch, and Y. H. Chen // Opt. Lett. — 2020. — Vol. 45. — No. 20. — P. 5848–5851.
- [11] **Shandarov, S. M.** Collinear and isotropic diffraction of laser beam and incoherent light on periodically poled domain structures in lithium niobate / S. M. Shandarov, A. E. Mandel, S. V. Smirnov, T. M. Akylbaev, M. V. Borodin, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // Ferroelectrics. — 2016. — Vol. 496. — P. 134–142.
- [12] **Шандаров, С. М.** Дифракционные и интерферометрические методы исследования периодически поляризованных доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития / С. М. Шандаров, А. Е. Мандель, Е. Н. Савченков, М. В. Бородин, С. В. Смирнов, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // Голография. Наука и практика : XIV международная конференция HOLOEXPO 2017: Тезисы докладов / МГТУ им. Н. Э. Баумана, ООО «МНГС». — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — С. 203–209.
- [13] **Shandarov, S. M.** Linear diffraction of light waves on periodically poled domain structures in lithium niobate crystals: collinear, isotropic, and anisotropic geometries / S. M. Shandarov, A. E. Mandel, T. M. Akylbaev, M. V. Borodin, E. N. Savchenkov, S. V. Smirnov, A. R. Akhmatkhanov, V. Yu. Shur // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 867. — P. 012017.

- [14] Савченков, Е. Н. Анизотропная дифракция лазерного излучения на регулярных доменных структурах в кристаллах LiNbO₃ и LiTaO₃ / Е. Н. Савченков, Н. И. Буримов, С. М. Шандаров, Д. А. Губинская, М. А. Федянина, А. Р. Ахматханов, М. А. Чувакова, В. Я. Шур // Сборник тезисов IV семинара «Современные нанотехнологии» (IWMN-2022).: Екатеринбург, УрФУ. — 2022. — С. 114–115.
- [15] **Volk, T.** Lithium Niobate: Defects, Photorefraction and Ferroelectric Switching / T. Volk, M. Wöhlecke // Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. — 247 p.
- [16] **Nikogosyan, D. N.** Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey / D. N. Nikogosyan // Springer Science + Business Media, 2005. — 429 p.
- [17] **Bruner, A.** Temperature-dependent Sellmeier equation for the refractive index of stoichiometric lithium tantalate / A. Bruner, D. Eger, M. B. Oron, P. Blau, M. Katz, S. Ruschin // Opt. Lett. — 2003. — V. 28. — P. 194–196.
- [18] **Xu, J.** Acousto-optic devices: principles, design, and applications / J. Xu, R. Stroud // Wiley. — 1992.

Temperature dependences of light diffraction effects on regular domain structures in lithium tantalate crystals

*S. M. Shandarov¹, A. V. Dubikov¹, E. N. Savchenkov¹, D. A. Gorbunova¹, M. A. Fedjanina¹,
N. I. Burimov¹, A. R. Akhmatkhanov², M. A. Chuvakova², V. Ja. Shur²*

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

² Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

The paper presents the results of a study of the temperature dependences of the isotropic and anisotropic Bragg diffraction effects on a regular domain structure with a period of 7.99 μm created in 1%MgO:LiTaO₃ stoichiometric crystal by switching polarization in a spatially periodic field. Various degenerate variants of Bragg diffraction with two and three diffraction maxima with an efficiency of about 0.4 % were observed in the temperature range from 10 to 110 °C, including an isotropic point at T_i = 66 °C.

Keywords: Regular domain structure, Bragg diffraction, Anisotropic diffraction, Lithium tantalate.

Голографическое и люминесцентное проявление микроскопического движения наночастиц и молекул

Л. Н. Бородина, А. О. Орлова, А. В. Вениаминов

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Инициированное светом диффузионное движение молекул и наночастиц приводит к проявлению высокоэффективных дифракционных структур или, напротив, к их разрушению. Отслеживание изменений дифракционных свойств голограммы позволяет судить о порождающих их диффузионных процессах, пространственный масштаб которых задаётся периодом голограммы. Альтернативно информация о микромасштабном движении может быть получена из динамики пространственно неоднородной картины люминесценции, при этом могут использоваться как периодические, так и непериодические распределения. Как голографический, так и люминесцентный подходы способны выявлять свойства диффундирующих частиц как в исходном, так и в фототрансформированном состояниях, проявляющиеся в эффектах дополнительных решёток и противонаправленных профилях люминесценции. Обзор двух подходов дополнен полученными с их помощью данными сравнительных экспериментов.

Ключевые слова: Голограммная решётка, Релаксация, Восстановление люминесценции, Конфокальная микроскопия, Диффузия.

Цитирование: Бородина, Л. Н. Голографическое и люминесцентное проявление микроскопического движения наночастиц и молекул / Л. Н. Бородина, А. О. Орлова, А. В. Вениаминов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 435–438.

Движение молекул и наночастиц в высоковязких средах, таких как стеклообразные полимеры, почти не проявляется на макроскопическом уровне, но оказывает заметное влияние на свойства таких структур с микроскопическими характерными размерами, как голографические решётки. Наблюдение и анализ изменений дифракционной эффективности решёток, вызванных снижением модуляции концентрации составляющих их элементов, и следовательно модуляции показателя преломления или коэффициента поглощения, вызванных размыванием структуры решётки вследствие диффузии, даёт возможность судить об изменении размеров молекул или частиц, микровязкости сред, изучать чрезвычайно медленные релаксационные процессы в стеклообразных средах, почти недоступные иным методам. Характерная особенность голографического релаксационного метода состоит в том, что, в отличие от, например, голографической же интерферометрии, решётка записывается в объекте исследования, а не на стороннем носителе. Пространственная неоднородность материалов на субмикронном уровне порождает на первый взгляд парадоксальную зависимость эффективного коэффициента диффузии нанозонда от пространственного

масштаба эксперимента, задаваемого пространственным периодом решётки, но не равного ему. Благодаря этому появилась возможность определения микровязкости различных микродоменов как в таких очевидно неоднородных материалах, как латексные плёнки, так и в стеклообразных оптических полимерах, даже когда их неоднородность не проявляется в рассеянии света. Динамика дифракционной эффективности, в простейшем варианте экспоненциальная, в более общем случае приобретает немонотонную форму (рис. 1) и несёт информацию о диффузии нанозондов как в исходном, так и в фототрансформированном состоянии. Ситуация, в которой диффузионная подвижность наночастицы или молекулы меняется при экспонировании особенно сильно, может быть использована не только для одновременного исследования подвижности малых зондов и, например, макромолекул с присоединёнными к ним метками, но и для формирования в полимерных средах высокоэффективных голограммных оптических элементов с самопроизвольным проявлением [1].

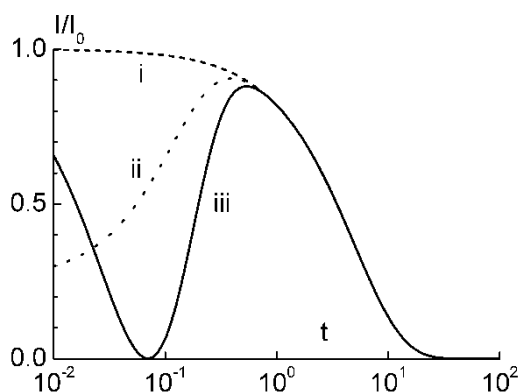


Рис. 1. Возможные формы динамики дифракционной эффективности, наблюдаемые без изменения (i) и при изменении коэффициента диффузии (ii, iii)

Дополнительный к голографическому способ изучения микроскопической подвижности молекул и наночастиц, также использующий наблюдение фотоиндуцированных неоднородностей в содержащей их среде, однако не обязательно периодических, основан на лазерной сканирующей микроскопии люминесцирующих сред. Он является дальнейшим развитием метода восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания и состоит в экспонировании узкой полоски материала сфокусированным лазерным лучом сканирующего микроскопа, вызывающим изменение квантового выхода люминесценции материала, с последующим анализом формы поперечного профиля интенсивности люминесценции, расширяющегося вследствие диффузионного взаимопроникновения компонент материала в исходном и фотоиндуцированном состояниях. Характерные гидродинамические размеры наночастиц, проявляющиеся в измерениях, как правило, соответствуют результатам измерения методом динамического рассеяния света, а в измерении молекул красителей люминесцентный метод имеет очевидное преимущество перед рассеянием. Если экспонирование приводит к изменению не только квантового выхода люминесценции, но и

коэффициента диффузии компонент системы, то профиль усложняется (примеры приведены на рис. 2), перестаёт быть гауссовым, и его отслеживание позволяет получить информацию о свойствах и исходной, и трансформированной форм, подобно динамике дифракционной эффективности в голографическом методе.

Оба рассмотренных метода позволяют обращаться к микромасштабному движению наночастиц и молекул в различных средах, используя простой математический аппарат, в широких пределах варьируя пространственный и временной масштабы измерений и получая сопоставимые результаты по гидродинамическим размерам частиц, микровязкости и микронеоднородности окружения, но тот факт, что люминесцентный подход базируется на микроскопической технике, обеспечивает ей преимущество в визуализации и отнесении к исходной и фототрансформированной формам, в то время как голография свободна от ограничения своей применимости люминесцирующими объектами и более естественно обращается к меньшим пространственным масштабам.

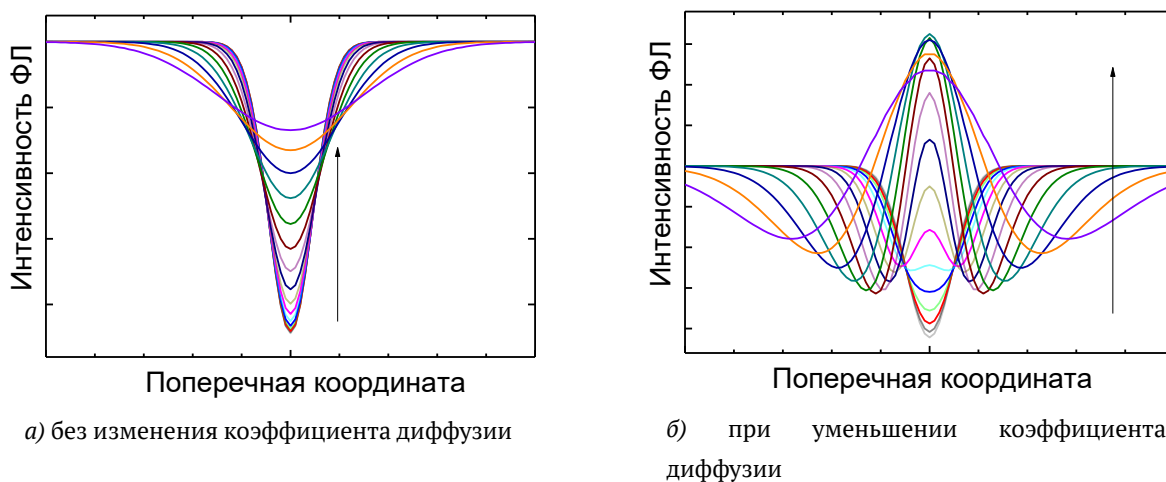


Рис. 2. Примеры последовательностей поперечных профилей интенсивности фотолюминесценции при уменьшении квантового выхода без изменения коэффициента диффузии (а) и при одновременном уменьшении квантового выхода и коэффициента диффузии (б)

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, госзадание 2019-1080, и гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО (Л.Н.Б.).

Список источников

- [1] **Вениаминов, А.В.** Голографические полимерные материалы с диффузионным проявлением: принципы, компоновка, исследования и применения / А. В. Вениаминов, В.В. Могильный // Оптика и спектроскопия. — 2013. — Том 115. — № 6. — С. 1014–1038.

Holographic and luminescence response of nanoparticles' and molecules' micromotion

L. N. Borodina, A. O. Orlova, A. V. Veniaminov

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Light-induced diffusion of molecules and nanoparticles leads to the development of efficient diffraction structures or to their destruction. Tracking changes in the diffraction properties of a hologram allows for judging on the diffusion, the scale of which is determined by the spatial period. Alternatively, information on the micro-scale movement can be obtained from the dynamics of the spatially heterogeneous luminescence pattern, either periodic or non-periodic. Both holographic and luminescence approaches reveal the properties of intact and phototransformed diffusing species, manifested in the complementary gratings and opposite luminescence profiles. A review of the two approaches is complemented by comparative experimental data.

Keywords: Holographic grating, Relaxation, Fluorescence recovery, Confocal microscopy, Diffusion.

К вопросу деградации тонких пленок оксида кремния в условиях высоких тепловых нагрузок

А. А. Скворцова, О. В. Володина, А. А. Скворцов

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Работа посвящена исследованию термоупругих напряжений и дефектообразованию в тонких пленках SiO₂ на кремнии при локальном импульсном нагреве поверхности. Показано, что воздействие на поверхности теплового источника (импульсный нагрев металлизированного участка поверхности, либо импульс лазерного диода $\lambda=405$ нм, P=5 Вт) тепловой мощностью $6 \cdot 10^5$ Вт/м² приводит к образованию микротрещин в пленках SiO₂. Проведена оценка величины механических напряжений, возникающих в структуре SiO₂-Si при тепловом ударе. Показано, что в отличие от пленок SiO₂ уровня возникающих механических напряжений в кремнии недостаточно для образования трещин вблизи источника теплового удара.

Ключевые слова: Тонкие пленки оксида кремния, Термоудар, Механические напряжения.

Цитирование: Скворцова, А. А. К вопросу деградации тонких пленок оксида кремния в условиях высоких тепловых нагрузок / А. А. Скворцова, О. В. Володина, А. А. Скворцов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 439–443.

Хорошо известно, что в современной оптоэлектронике активно используются тонкопленочные структуры на основе тонких пленок оксида кремния в качестве оптических элементов, подзатворного диэлектрика, пассивирующих слоев и т.д [1,2]. Тонкие пленки оксида кремния используются также в качестве мембран в оптических фильтрах. При этом термические воздействия в процессе технологических операций могут приводить к возникновению в них растягивающих напряжений от 100 до 300 МПа. Обнаружено также, что коэффициент теплового расширения и остаточные напряжения в тонких пленках изменяются в зависимости от толщины пленки [3].

Высокие тепловые нагрузки на пленку могут приводить формированию трещин различной формы, такие как спирали, аллеи полумесяцев и разно ориентированные полосы [4]. Многие уникальные морфологии трещин могут наблюдаться не только после термоударов, но и после высокотемпературной сушки [5,6].

Таким образом, процесс трещинообразования в тонких пленках оксида кремния играет очень важную роль в технологических процессах оптоэлектроники. Однако далеко не все аспекты трещинообразования в пленках SiO₂ детально изучены. К примеру, недостаточно информации по влиянию поверхностных источников термоудара на образование трещин в пленках, не выявлены критические параметры тепловых импульсов, способствующих образованию и развитию трещин в тонких пленках оксида.

Для оценки температуры поверхности пленки использовалось полученное ранее уравнение, позволяющее оценить распределение температуры по поверхности пленки при наличии источника тепла в виде металлизированного участка поверхности (рис. 1) с

плотностью теплового потока (при протекании постоянного тока силой I вдоль оси x дорожки с сопротивлением R):

$$q = \frac{I^2 R}{lb}. \quad (1)$$

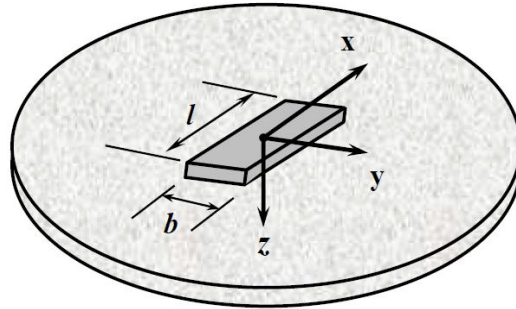


Рис. 1. Схема расположения исследуемого фрагмента металлизации на пластине

Распределение температуры на поверхности $T(y, t)$ представляется в виде [7]

$$T(y, t) - T_0 = \frac{I^2 R}{2\pi\lambda lb} \left\{ \left(\frac{b}{2} - y \right) E_1 \left(\frac{(b/2 - y)^2}{4at} \right) + \left(\frac{b}{2} + y \right) E_1 \left(\frac{(b/2 + y)^2}{4at} \right) + \right. \\ \left. + \frac{I^2 R \sqrt{at}}{\sqrt{\pi\lambda lb}} \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{b/2 - y}{\sqrt{4at}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{b/2 + y}{\sqrt{4at}} \right) \right\} \right\}, \quad (2)$$

где $E_1(z) = \int_z^\infty \frac{\exp(-\xi)}{\xi} d\xi$ – интегральная экспонента, l , b – длина и ширина фрагмента металлизации соответственно, λ – теплопроводность, c , d , a – теплоемкость, плотность и температуропроводность соответственно. Поскольку λ , c , d , a зависят от температуры, то, как и ранее [7], для расчетов T использовались их значения, усредненные по температуре.

Результаты расчета по уравнению (2) для систем Al-Si и Al-SiO₂ показали, что температурный профиль $T(y, t)$ в направлении поперек дорожки металлизации неоднороден. Причем с увеличением плотности мощности импульса (диапазон изменения $P = (1,5 \dots 8) \cdot 10^5$ Вт/м²) в импульсе изменения температуры $\Delta T(t) = T(0, t) - T(b/2, t)$ могут достигать на структуре Al-SiO₂ ~100 К. Такие тепловые «нагрузки» способствуют появлению сильных температурных градиентов и соответственно возникновению механических напряжений:

$$\sigma_{ik} = -K\beta \{T(r, t) - T_0\} \delta_{ik}. \quad (3)$$

что может приводить к релаксации напряжений путем пластической деформации и образованию трещин в приповерхностном слое материала, на который нанесена металлическая пленка. Здесь и далее σ_{ik} – тензор напряжений; K – модуль всестороннего сжатия; β – коэффициент теплового расширения; δ_{ik} – тензор Кронекера.

Результаты расчета механических напряжений приведены на рис. 2. Нетрудно видеть, что при мощности электрического импульса $4,3 \cdot 10^5$ Вт/м² на межфазной границе структуры Al-SiO₂ возникающие напряжения превышают предел прочности материала подложки (пунктир, рис. 2). Поэтому при таких условиях в рассматриваемой системе могут развиваться процессы образования трещин [8]. При этом наибольший рост величины механических напряжений происходит в первые 150–200 мкс с момента включения импульса (рис. 2).

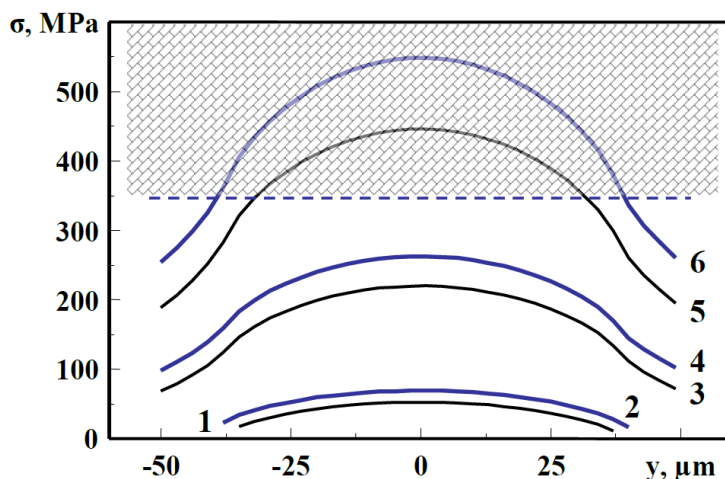


Рис. 2. Распределение механических напряжений на межфазной границе алюминиевая пленка-подложка Si (кривые 1,3,5) и SiO₂ (кривые 2,4,6) в процессе прохождения импульса тока при $t=150 \mu\text{s}$ с момента включения и удельной мощности: 1,2– $1,2 \cdot 10^5$ Вт/м²; 3,4– $2,7 \cdot 10^{10}$ Вт/м²; 5,6– $4,3 \cdot 10^{10}$ Вт/м². Пунктирная линия – предел прочности для SiO₂ $\sigma_B=300$ МПа

Таким образом, результаты численного моделирования показали, что в результате теплового удара на поверхности кристалла SiO₂ возможно достижение механических напряжений сравнимых с пределом прочности.

Экспериментальная проверка осуществлялась на многослойных структурах кремниевая подложка - пленка оксида кремния-алюминиевая пленка (Si-SiO₂-Al). В качестве подложек использовались легированные фосфором кремниевые монокристаллические пластины толщиной 300 мкм, с удельным сопротивлением в диапазоне $\rho = 0,1$ Ом·см. В качестве проводящей металлической пленки был использован алюминий толщиной 5 мкм. Нанесение пленок термического оксида производилось в диффузионных печах путем отжига кремниевых подложек в диапазоне температур 1150–1250 °С в сухом кислороде в течении 1-5 часов. Толщина пленок SiO₂ варьировалась в диапазоне 0,08...0,16 мкм.

Формирование тестовых структур и исследование их температурных режимов работы в импульсном режиме осуществлялись по методике [9]. Тепловой удар на поверхности пленки оксида обеспечивался прохождением одиночных токовых импульсов различной формы или излучением лазерного диода ($\lambda = 405$ нм, $P = 5$ Вт). Анализ температуры поверхности пленки проводился с помощью тестовых структур осциллографическим методом по методике [9].

Результаты экспериментальных исследований показали, толщина диэлектрического подслоя сильно влияет на тепловые режимы многослойных систем. Изменение толщины

пленки оксида кремния h_2 с 0,1 до 0,16 мкм повышает температуру Al-пленки T_1 с 390 до 440 К при $t=400$ мкс с момента включения импульса. Это приводит к более раннему перегреву структур. Так при одинаковой удельной мощности импульса тока $P = 2,8 \cdot 10^5$ А/м² прогрев дорожек металлизации происходит тем быстрее, чем больше толщина промежуточного полупроводникового слоя. И, следовательно, увеличению механических напряжений.

Проведенные металлографические исследования подтвердили наличие процессов трещинообразования в пленках оксида кремния при достижении критических плотностей тока (рис. 3) и на границе дорожки ($y = \pm b/2$) образование трещин четко фиксируется (рис. 3).



1 – дорожка металлизации после оплавления, 2 – микротрещино в пленке оксида кремния

Рис. 3. Фотография поверхности оксидной пленки с напыленной дорожкой алюминиевой металлизации после прохождения одиночного токового импульса удельной мощностью $P=3,4 \cdot 10^5$ Вт/м² и длительностью $\tau=500$ мкс.

Таким образом, в работе рассмотрено влияние тонких диэлектрических слоев оксида кремния на динамику нагрева межсоединений на кремнии и возникающие при этом в структурах механические напряжения. Показано, что прохождение токовых импульсов амплитудой до $5 \cdot 10^5$ Вт/м² (длительностью до 500 мкс) приводит к тепловому разрушению межсоединений вплоть до обрывов электрической цепи. Возникающие при это механические напряжения термоупругой природы приводят к образованию трещин в тонких пленках оксида кремния.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 22-29-01373.

Список источников

- [1] Büchner C., Heyde M. Two-dimensional silica opens new perspectives. //Progress in Surface Science. 2017. Vol. 92. Iss.4. P. 341-374.
- [2] Nikitin T., Khriachtchev L. Optical and structural properties of Si nanocrystals in SiO₂ films. //Nanomaterials. 2015. Vol. 5. Iss. 2. P. 614-655.
- [3] Ghaderi M., De Graaf G., Wolffenbuttel R.F. Thermal annealing of thin PECVD silicon-oxide films for airgap-based optical filters. // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2016. Vol. 26. Iss. 8. Article №084009.

- [4] Goehring L., Nakahara A., Dutta T., Kitsunezaki S., Tarafdar S. Desiccation Cracks and their Patterns: Formation and Modelling in Science and Nature. Wiley-VCH Verlag GmbH. 2015. 349 p.
- [5] Cheng F., Ma L., Ni Y. Formation of wavy crack morphology in silicon oxide films due to collaborative interface debonding. //Scientia Sinica: Physica, Mechanica et Astronomica. 2018.Vol. 48. Iss. 9. Article N° 094614. 10 p.
- [6] Ho C., Alexis J., Dalverny O., Balcaen Y., Dehoux A., Châtel S., Faure B. Mechanical adhesion of SiO₂ thin films onto polymeric substrates. //Surface Engineering. 2019. Vol. 35. Iss. 6. P. 536-541.
- [7] Skvortsov A.A., Varlamov D.O., Nikolaev V.K., Volodina O.V., Skvortsova A.A. Shock-wave Processes in the Electric Explosion of Thin-Film Systems on Silicon. // Silicon. 2023. 15(4). P. 1987–1992.
- [8] William C. O'Mara, Robert B., Herring Lee P. Hunt. Handbook of Semiconductor Silicon Technology. 1990. Imprint: William Andrew. 815 p.
- [9] Skvortsov A., Zuev S., Koryachko M., Glinskiy V. Thermal shock and degradation of metallization systems on silicon. //Microelectronics International. 2016. Vol.33. Iss. 2. P. 102-106.

On the issue of degradation of thin films of silicon oxide under conditions of high thermal loads

A. A. Skvortsova, O. V. Volodina, A. A. Skvortsov

Moscow polytechnic university, Moscow, Russia

The work is devoted to the study of thermoelastic stresses and defect formation in thin films of SiO₂ on silicon under local pulsed heating of the surface. It is shown that the impact of a heat source on the surface (pulse heating of a metalized surface area, or laser diode pulse $\lambda=405$ nm, P=5 W) with a thermal power of $6 \cdot 10^5$ W/m² leads to the formation of microcracks in SiO₂ films. An estimate of the magnitude of mechanical stresses arising in the SiO₂-Si structure under thermal shock has been carried out. It is shown that, in contrast to SiO₂ films, the level of mechanical stresses that arise in silicon is insufficient for the formation of cracks near the source of thermal shock.

Keywords: Silica thin films, Thermal shock, Mechanical stress.

Голографическое структурирование и формообразование в фотополимерах

Н. Д. Ворзобова, П. П. Соколов

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Определены условия и механизмы формирования эффективных объемных, гибридных, рельефных и двумерных решеток в фотополимерных материалах в интерференционном поле. Исследованы дифракционные и селективные свойства структур в широком угловом диапазоне. Рассмотрены возможные применения полученных свойств для решения задач солнечной энергетики, защищенной печати, дифракционной оптики. Предложен метод голографического формообразования в объеме полимерного материала – метод голографической 3D печати, как альтернатива аддитивным технологиям с преимуществом исключения последовательного синтеза трехмерного изделия. Выявлены и изучены факторы, определяющие размерные характеристики и конфигурации трехмерных объектов. Представлены результаты реализации метода.

Ключевые слова: Объемные, рельефные и гибридные голографические решетки, Голографическая 3D печать.

Цитирование: **Ворзобова, Н. Д.** Голографическое структурирование и формообразование в фотополимерах / Н. Д. Ворзобова, П. П. Соколов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 444–449.

Введение

Постоянное совершенствование регистрирующих сред, разработка новых материалов, появление новых практических задач выдвигает новые требования к свойствам элементов на их основе и новым технологиям. Данная работа направлена на изучение процессов интерференционного структурирования в фотополимерных материалах и получение новых свойств периодических структур для решения актуальных практических задач солнечной энергетики, защищенной печати, дифракционной оптики, а также разработку нового метода голографического формообразования в объеме материала с преимуществом относительно существующих технологий.

1. Голографическое структурирование фотополимеров и свойства периодических структур

Рассмотрены условия получения и механизмы формирования в интерференционном поле периодических структур различных типов — объемных ненаклонных и наклонных решеток, гибридных и двумерных структур в фотополимерах и исследованы их дифракционные свойства при падении излучения в широком угловом диапазоне. В качестве регистрирующих сред использовались лабораторные акрилатные композиции [1] (Университет ИТМО) и промышленные материалы: Bayfol HX (Covestro AG), Nano Clear (FunToDo), NOA-68 (Norland).

Установлено, что гибридные решетки (объемные решетки, на поверхности которых формируются рельефные решетки) с наибольшей дифракционной эффективностью (ДЭ) рельефной компоненты (до 45%) формируются в жидких акрилатных композициях на начальном этапе записи, в области малых экспозиций в узком временном диапазоне, в светлой области интерференционного поля. Решетки поверхностного рельефа формируются в результате снятия покрывающей пленки после экспонирования, обеспечивающего восстановление распределения материала, сформированного вследствие процессов массопереноса и усадки.

В сухом фотополимере Bayfol NX получены эффективные объемные решетки (с ДЭ более 80%), однако поверхностный рельеф не формируется. В жидкой композиции Nano Clear не удалось записать объемные решетки с высокой ДЭ, однако при записи на длине волны 375 нм получены достаточно эффективные рельефные решетки. В результате исследования зависимости ДЭ от экспозиции, плотности мощности, частоты записи, толщины слоя, постэкспозиционной обработки в различных растворителях и последующей засветки УФ излучением, получены рельефные решетки с ДЭ около 40%.

Для получения двумерных объемных решеток использовался фотополимер Bayfol NX. Однако при последовательной записи одномерных решеток выявилось существенное влияние наложенной записи на ДЭ компонент. Согласно имеющимся представлениям это связано с проявлением процессов нелокальной полимеризации, влияние которых исключается трудоемким методом итерационного экспонирования с учетом параметров полимеризации [2,3]. В данной работе уменьшение влияния наложенной записи достигается при одноэкспозиционном интерференционном копировании шаблона, полученного в высокоразрешающем галогенсеребряном материале (ПФГ-03М) с меньшей критичностью к составляющим экспозициям. Получены двумерные структуры с отношением интенсивностей в пяти дифракционных порядках около 1:1.5.

Результаты исследования дифракционных и селективных свойств объемных и гибридных решеток при падении излучения в широком угловом диапазоне в трехмерном пространстве выявили следующие закономерности. Для объемных решеток при падении излучения в брэгговской плоскости максимальная ДЭ (более 80%) сохраняется в угловом диапазоне более 80° при полуширине контура угловой селективности около 120°. При угловом отклонении от брэгговской плоскости до 30° положение максимума ДЭ сдвигается в сторону больших углов падения (более 70°). Следует отметить, что для гибридных решеток дифракционная эффективность в диапазоне $D_{\text{max}} - 0.5 D_{\text{max}}$ достигается в большем угловом диапазоне по сравнению с объемными решетками и определяется вкладом рельефной компоненты. На рис. 1 приведены зависимости ДЭ от угла падения излучения (650 нм) в трехмерном пространстве, определяемого сочетанием углов падения (α) и отклонения от брэгговской плоскости (β) для объемных и гибридных решеток.

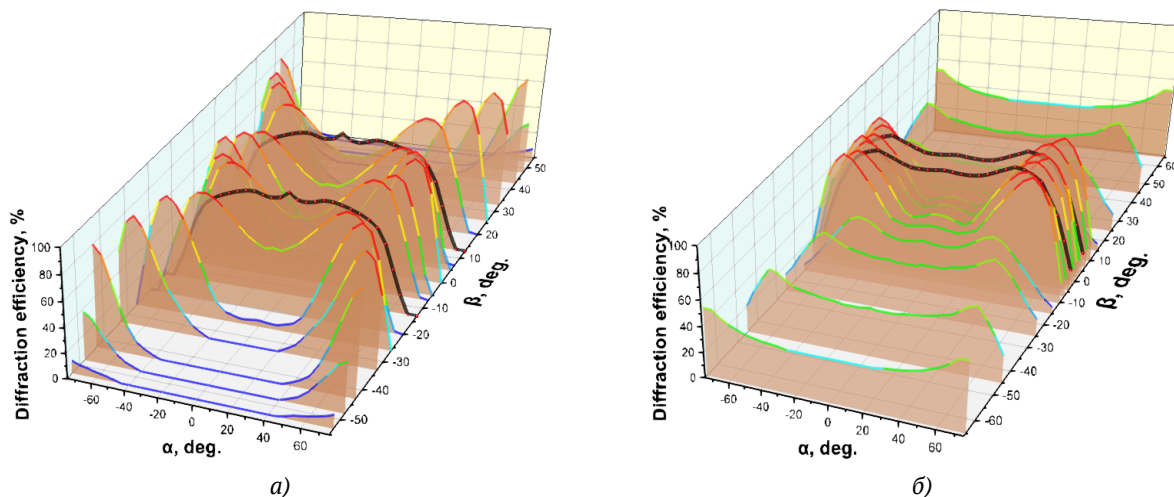


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности объемных (а) и гибридных (б) решеток от угла падения в трехмерном пространстве

Установленные свойства представляют интерес для решения задач солнечной энергетики – получения дифракционных дефлекторов, перенаправляющих излучение в широком диапазоне углов в одно направление, при увеличении рабочего углового диапазона, относительно существующих решений [4-8], а также технологий защищенной печати – получения пропускающих защитных элементов и дифракционных управляемых расщепителей лазерных пучков.

2. Исследование процессов формообразования в объеме полимерного материала

Приведены результаты исследований процессов формообразования в объеме полимерного материала предлагаемым методом голографической 3D печати, основанном на проекции голографического изображения формируемого объекта в объем фотополимерного материала и его отображении в области наибольшей резкости при ограничении полимеризации вне данной области. Преимуществом предлагаемого метода относительно аддитивных технологий, основанных на последовательном (поточечном или послойном) формировании трехмерного объекта, является исключение последовательного синтеза в результате формирования всего объекта при однократном экспонировании.

Рассмотрены возможные способы ограничения полимеризации вне области наибольшей резкости. Наибольшее внимание уделено роли поглощения формирующего излучения в объеме материала в процессе одноэкспозиционного формообразования. Установлена связь глубины профиля формируемого объекта с материальными параметрами (показатель поглощения, пороговая чувствительность) и экспозиционными параметрами (мощность лазера, ДЭ проектирующей голограммы, площадь формируемого объекта, длительность экспонирования).

Показано, что увеличение поглощения - K_{λ} более 10 см^{-1} , благоприятное для ограничения полимеризации за область наибольшей резкости проектируемого изображения, приводит к различиям в экспозиционных параметрах и может приводить к искажению профиля поверхности протяженных по глубине объектов. Таким образом, увеличение поглощения имеет преимущества для получения малоразмерных объектов (с протяженностью по глубине 50 мкм–2 мм).

Рассмотрены факторы, определяющие размерные характеристики трехмерных объектов, а именно, размерные трансформации проектируемых изображений при различии длин волн и геометрических параметров схем записи проектирующей голограммы и схемы голографической 3D печати. Показано, что при увеличении длины волны формирующего (восстанавливающего) излучения относительно длины волны записи проектирующей голограммы размерные трансформации увеличиваются. Кроме того, возможно инвертирование конфигурации объекта.

При уменьшении длины волны, в частности использовании УФ излучения в качестве формирующего, размеры изображений и размерные трансформации по глубине уменьшаются, что благоприятно для получения малоразмерных элементов. Кроме того, использование УФ излучения позволяет перейти на материалы со спектральной чувствительностью в УФ области.

На рис. 2 приведены результаты реализации метода голографической 3D печати в зеленой и УФ областях спектра.

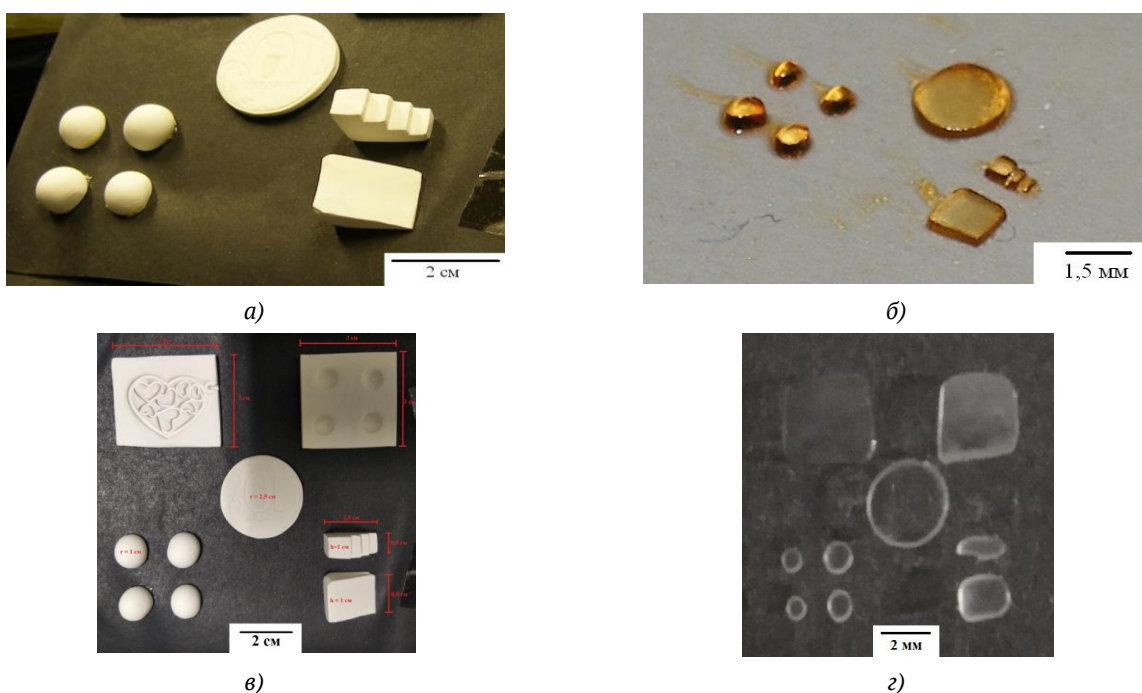


Рис. 2. Примеры реализации метода голографической 3D печати в зеленой (а, б) и УФ областях спектра (в, г). (а, в) — вид поля модельных объектов с плоской, сферической, наклонной и ступенчатой формой поверхности. (б, г) — поле полимерных элементов

Для записи в зеленой области (рис. 2б) использовалось излучение лазера с длиной волны 530 нм, выходной мощностью 200 мВт и лабораторные акрилатные композиции [9]. Для записи в УФ области (рис. 2г) использовалось излучение лазера с длиной волны 375 нм и выходной мощностью 25 мВт и новый промышленный фотополимерный материал Nano Clear. Получено поле трехмерных объектов с плоской, сферической, наклонной и ступенчатой формой поверхности. Поле элементов получено при однократном экспонировании при общей длительности процесса десятки секунд.

Заключение

Определены условия формирования эффективных объемных и гибридных решеток и проведено детальное исследование их дифракционных и селективных свойств в широком диапазоне углов падения излучения в трехмерном пространстве. Установлены новые свойства, определяющие расширение углового диапазона с максимальной дифракционной эффективностью относительно существующих решений и представляющие интерес для решения задач солнечной энергетики.

Показано преимущество одноэкспозиционного метода интерференционного копирования, исключающего влияние наложенной записи в фотополимерных материалах, для получения эффективных двумерных решеток, которые могут использоваться в качестве многоканальных управляемых расщепителей лазерных пучков.

Применительно к разработке нового метода формообразования в объеме полимерного материала — метода голографической 3D печати, выявлены и исследованы факторы, определяющие процесс формообразования, размеры и конфигурации трехмерных объектов, а также преимущества для получения малоразмерных объектов в результате однократного экспонирования, исключающего последовательный синтез.

Список источников

- [1] **Burunkova, Yu.E.** Nanomodified optical acrylate composites /Yu.E. Burunkova , S. A. Semina , L. N. Kaporski, V. V. Levichev. // J. Opt. Technol. — 2008. — Vol.75. — P. 653-657.
- [2] **Lee, J. H.** Holographic Solar Energy Concentrator Using Angular Multiplexed and Iterative Recording Method./H. Lee, H. Y. Wu, M. L. Piao, N. Kim. // IEEE Photonics Journal. — 2016. — Vol. 8. — No. 6. — P. 8400511.
- [3] **Pen, E. F.** Dynamics of Diffraction Efficiency of Superimposed Volume Reflection Holograms at Their Simultaneous Recording in Photopolymer Material/E. F. Pen.// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. — 2020. — Vol. 56. — No. 4. P. 340–349.
- [4] **Akbari, H.** Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications /Akbari H., Naydenova I., Martin S. // Appl. Opt. — 2014. — Vol. 53. — P. 1343–1363.
- [5] **De Jong, T. C.** Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators /De Jong T., de Boer D., Bastiaansen // Opt. Exp. — 2011. — Vol. 19. — P. 15127–15143.
- [6] **Xiang, X.** Bragg polarization gratings for wide angular bandwidth and high efficiency at steep deflection angles /Xiang X., Kim J., Escuti M.J. // Sci. Rep. — 2018. — Vol. 8. — P. 7202.

- [7] **Marín-Sáez, J.**, Characterization of volume holographic optical elements recorded in Bayfol HX photopolymer for solar photovoltaic applications /Marín-Sáez J, Atencia J., Chemisana D., Collados M.-V. // Opt. Exp. — 2016. — Vol. 24. — P. 720–730.
- [8] **Keshri, S.** Stacked volume holographic gratings for extending the operational wavelength range in LED and solar applications /Keshri S., Marín-Sáez J., Naydenova I., Murphy K., Atencia J., Chemisana D., Garner S., Collados M.V., Martin S. // Appl. Opt. —2020. — V. 59. — P. 2569 –2579.
- [9] **Vorzobova, N. D.** Formation of 3D structures in a volumetric photocurable material via a holographic method /N. D. Vorzobova, V. G. Bulgakova, V. O. Veselov. // Optics and Spectroscopy. —2015. —Vol. 119. —№. 6. —P. 1034-1037.

Holographic structuring and shaping in photopolymers

N. D. Vorzobova¹, P. P. Sokolov¹

ITMO University, St. Petersburg, Russia

The conditions and mechanisms for the formation of effective volume, hybrid, relief, and two-dimensional gratings in photopolymer materials in an interference field are determined. The diffraction and selective properties of the structures in a wide angular range are studied. Possible applications of the obtained properties for solving problems of solar energy, security printing, and diffractive optics are considered. A method of holographic shaping in the volume of a polymer material - the method of holographic 3D printing, as an alternative to additive technologies with the advantage of eliminating the sequential synthesis of a three-dimensional object is proposed. The factors that determine the dimensional characteristics and configurations of three-dimensional objects are studied. The results of the implementation of the method are presented.

Keywords: Volume, relief and hybrid holographic gratings, Holographic 3D printing.

Модификация оптических свойств халькогенидных пленок ближним ИК лазерным излучением

А. А. Ольхова, А. А. Патрикеева, М. А. Дубкова, П. П. Омельченко, Б. Г. Шульга,
М. М. Сергеев

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе показано влияние лазерного облучения халькогенидных пленок PbSe на их оптические характеристики в результате необратимой модификации структуры. Исследованы особенности модификации структуры и свойств пленок под действием наносекундных лазерных импульсов с длиной волны 1064 нм. Применение лазерных импульсов ближнего инфракрасного диапазона (ИК) обеспечивало модификацию структуры пленки при плотности мощности 2,4–18,2 МВт/см² и длительности импульсов от 4 до 50 нс. Исследованы характеристики лазерного источника, в частности температура лазерного пучка и его влияние на физический механизм модификации структуры пленки. Сканирование лазерным пятном в указанных режимах обеспечивает желаемое изменение оптических характеристик пленки, и это становится серьезной альтернативой технологии тепловой обработки в печи.

Ключевые слова: Лазерная модификация, Пленки PbSe, Оптические характеристики, Режим потемнения, Режим просветления, Тепловая обработка, Лазерные импульсы.

Цитирование: Ольхова, А. А. Модификация оптических свойств халькогенидных пленок ближним ИК лазерным излучением / А. А. Ольхова, А. А. Патрикеева, М. А. Дубкова, П. П. Омельченко, Б. Г. Шульга, М. М. Сергеев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 450–453.

Введение

Халькогенидные пленки часто используются в качестве фотоизлучателей в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне, а также в виде фотодатчиков [1]. Выбор пленок PbSe в качестве фотодетектора обусловлен тем, что такие материалы обладают высокой фоточувствительностью в диапазоне 1–5 мкм [2, 3], работоспособности при комнатной температуре, дешевы в производстве и обладают низким сопротивлением. Такие структуры на основе PbSe широко применяются для фотодетекторов в среднем ИК диапазоне спектра, для солнечных элементов, а также применяется для микроаналитики органических молекул в виде газовой смеси или жидкости [4].

Применение лазерного облучения позволяет осуществить локальную модификацию структуры и, вместе с этим, прогнозируемое изменение оптических и электрических характеристик пленок, тем самым корректируя фоточувствительность материала в определенном спектральном диапазоне.

1. Основная часть

В представленной работе изменение оптических характеристик образца проводилось за счет модификация структуры халькогенидных пленок PbSe наносекундными лазерными

импульсами ИК излучения. Лазерная обработка пленок PbSe в режиме построчного сканирования приводила к размягчению и перераспределению материала пленки (рисунок 1), и в случае увеличения длительности импульсов – к образованию аморфной оксидной фазы на поверхности образца (рисунок 2). Кроме того, получены оптические характеристики образцов в ближнем и среднем ИК диапазоне, которые свидетельствуют об уменьшении отражения и/или пропускания в диапазонах длин волн, которые соответствуют пикам поглощения газов CO, NO, NO₂ и HNO₃.

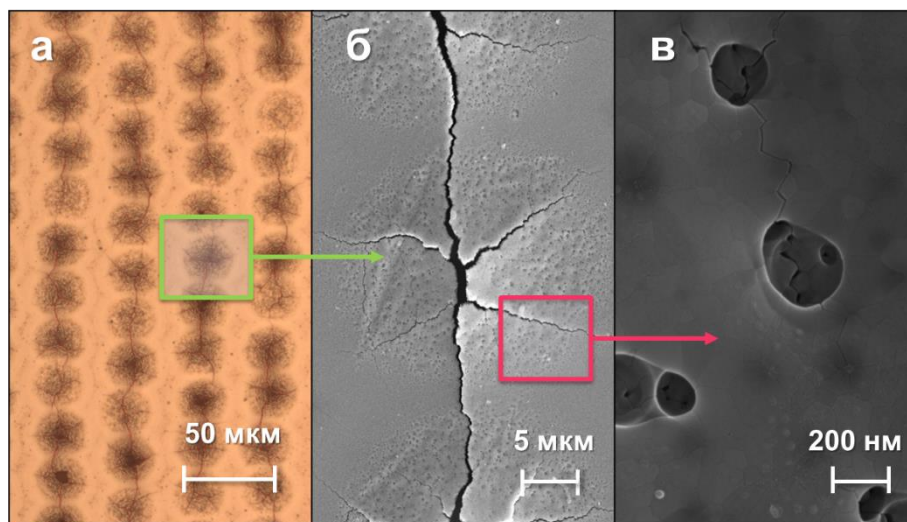


Рис. 1. Снимки пленки PbSe после модификации в режиме потемнения, полученные с помощью оптической микроскопии: в светлом поле отраженного света (а). Снимки пленки PbSe, полученные с помощью детектора вторичных электронов СЭМ (б, в).

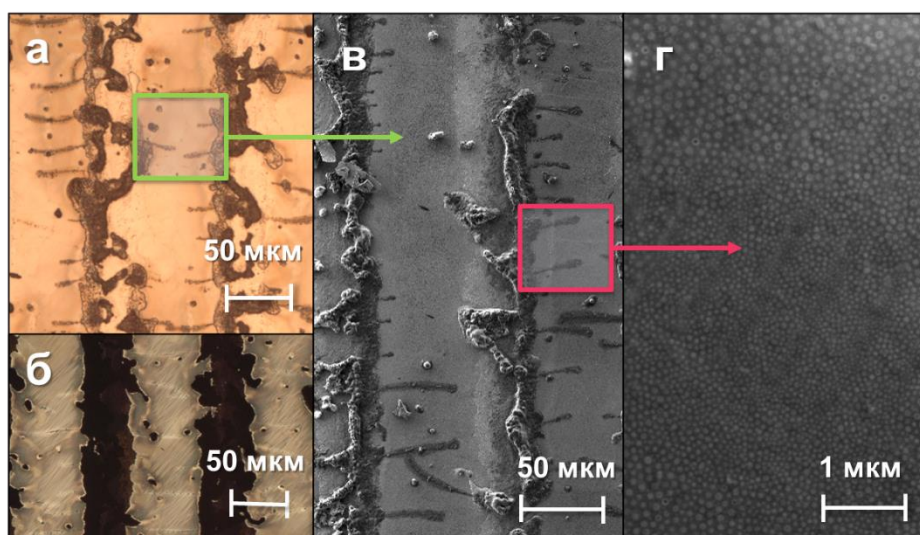
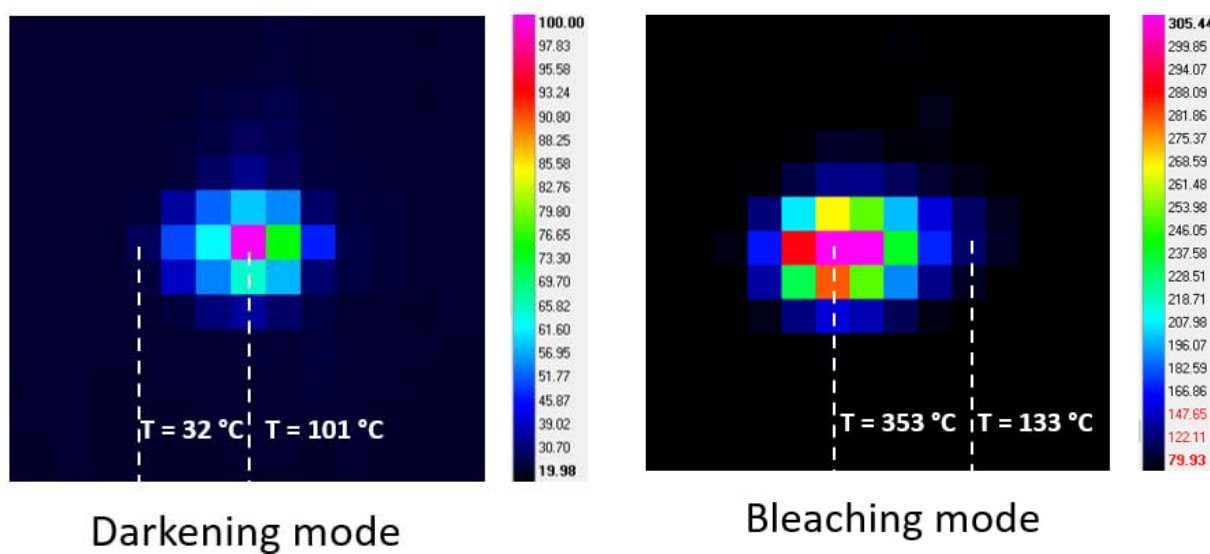


Рис. 2. Снимки пленки PbSe после модификации в режиме просветления, полученные с помощью оптической микроскопии: в светлом поле отраженного света (а), в поле прошедшего света (б). Снимки пленки PbSe, полученные с помощью детектора вторичных электронов СЭМ (в, г).

При достаточно низких температурах происходят изменения в структуре и свойствах материала, такие как кристаллическая решетка и оптические константы. Это позволяет получать новые физические свойства и улучшать характеристики материала. Контролируемая локализация и масштабируемость процесса являются преимуществами лазерной модификации при низкой температуре. На рисунке 3 видно, что в ходе лазерной модификации значение температуры в области лазерного пучка не превышает 353 °С для режима просветления и 102 °С для режима потемнения. Процессы, связанные с просветлением пленки, как и предполагалось протекают при более высоких температурах, нежели потемнение пленки.



а) режим потемнения

б) режим просветления

Рис. 3. Тепловизионные изображения лазерного пучка при лазерной модификации импульсным излучением: режим потемнения (а), режим просветления (б).

Заключение

Полученные результаты показывают, что модификация пленок импульсным лазерным излучением является перспективным направлением для улучшения оптических характеристик в ближнем и среднем ИК диапазоне. В дальнейшем возможно применение обработанных халькогенидных пленок в качестве датчиков органических веществ, а также в приложении газового анализа.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда (№ 23–29–10081) и гранта УМНИК.ФОТОНИКА.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Ma, X.** In situ monitoring of Pb²⁺ leaching from the galvanic joint surface in a prepared chlorinated drinking water / X. Ma, S. M. Armas, M. Soliman, D. A. Lytle, K. Chumbimuni-Torres, L. Tetard, W. H. Lee // *Environmental science & technology*. – 2018. – Vol. 52. – №. 4. – P. 2126-2133. DOI: 10.1021/acs.est.7b05526.
- [2] **Tan, C. L.** Mohseni H. Emerging technologies for high performance infrared detectors /Tan, Chee Leong, and Hooman Mohseni // *Nanophotonics*. – 2018. – Т. 7. – №. 1. – P. 169-197. DOI:10.1515/nanoph-2017-0061
- [3] **Karim, A.** Infrared detectors: Advances, challenges and new technologies / Karim A., Andersson J. Y. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2013. – Vol. 51. – №. 1. – P. 012001. DOI:10.1088/1757-899X/51/1/012001
- [4] **Kasiyan, V.** Infrared detectors based on semiconductor p-n junction of PbSe/ Kasiyan, V., Dashevsky, Z., M. Schwarz, C., Shatkhin, M., Flitsiyan, E., Chernyak, L., & Khokhlov, D.// – 2012. DOI: 10.1063/1.4759011

Chalcogenide films optical properties modification by NIR laser radiation

A. Olkhova, A. A. Patrikeeva, M. A. Dubkova, P. P. Omelchenok, B. G. Shulga, M. M. Sergeev
National Research University ITMO, St. Petersburg, Russia

The paper shows the effect of laser irradiation of PbSe chalcogenide films on their optical characteristics as a result of irreversible modification of the structure. The features of the modification of the structure and properties of films under the action of nanosecond laser pulses with 1064 nm wavelength have been studied. The use of near infrared (NIR) laser pulses ensured the modification of the film structure at a power density of 2.4–18.2 MW/cm² and a pulse duration of 4 to 50 ns. The characteristics of the laser source, in particular, the temperature of the laser beam and its effect on the physical mechanism of modification of the film structure, are studied. Scanning with a laser spot in these modes provides the desired change in the optical characteristics of the film, and this becomes a serious alternative to the technology of heat treatment in an oven.

Keywords: Laser modification, PbSe films, Optical characteristics, Darkening mode, Bleaching mode, Heat treatment, Laser pulses.

Эффективная толщина пропускающих голограмм в фотополимерных материалах

С. И. Алиев¹, Д. И. Деревянко¹, Е. Ф. Пен², В. В. Шелковников¹

¹ Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

Записаны пропускающие объёмные элементарные голограммы с использованием голографических фотополимерных материалов (ГФМ) на основе двух типов фотоиницирующих систем: красителя-соинициатора (КС) и сульфоний-боратного комплекса с переносом заряда (КПЗ). Выявлено, что для ГФМ-КС увеличение оптической плотности с 0,8 до 1,7 привело к уменьшению эффективной толщины пропускающей голограммы с 25 до 20 мкм. В ГФМ-КПЗ сформированы толстые (~ 50 мкм) пропускающие голограммы, у которых эффективная и физическая толщины совпали, модуляция коэффициента преломления составила ~ 0,002, а наличие боковых лепестков в контуре угловой селективности свидетельствует о равномерной пространственной структуре голограммы по толщине слоя.

Ключевые слова: голография, эффективная толщина голограмм, фотополимерные материалы.

Цитирование: Алиев, С. И. Эффективная толщина пропускающих голограмм в фотополимерных материалах / С. И. Алиев, Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 454–458.

Введение

На сегодняшний день активно разрабатываются и исследуются голографические фотополимерные материалы (ГФМ) [1, 2], которые используются в защитной голографии, системах хранения информации, голографических дисплеях [3–5]. ГФМ включает в себя полимерную матрицу, мономер, инициатор и краситель-соинициатор (КС). Поскольку КС обладает большой экстинкцией $\varepsilon \approx 10^4\text{--}10^5 \text{ л}\cdot\text{М}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$, это приводит к значительному поглощению света на определённой длине волны. В работе [6] авторами выявлено, что диапазон оптической плотности $D = 0,48\text{--}0,7$ является оптимальным для записи в ГФМ пропускающих голограмм с наибольшим значением дифракционной эффективности (ДЭ). Однако, влиянию D на эффективную толщину $T_{эф}$ записанных голограмм ранее было уделено мало внимания [6,7].

Отметим, что при выборе систем фотоиницирования альтернативным подходом является использования светочувствительных комплексов с переносом заряда (КПЗ), одним из преимуществ которых, в сравнении с традиционными системами, является небольшое значение коэффициента экстинкции $\varepsilon = 10\text{--}10^3 \text{ М}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ [8], которое позволяет проводить фотополимеризацию в толстых фотополимерных слоях, вплоть до 30 см [9].

Однако, ряд авторов наблюдали несоответствие эффективной толщины записанных голограмм с физической толщиной регистрирующего слоя [10, 11]. Одной из причин этого эффекта является неравномерное поглощение излучения материала.

Целью данной работы было изучение влияния оптической плотности материала на эффективную толщину записанных голограмм с использованием фотоиницирующих систем КС и КПЗ.

Экспериментальная часть

В работе использован фотополимерный материал на основе акриламидного мономера и поливинилацетата [12]. Методики приготовления плёнок и составы фотополимерных слоев при использовании КС, приведены в работе [13], при использовании КПЗ – в работе [8]. Запись голограмм проводили с использованием лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 639$ нм и $\lambda = 532$ нм. Подробное описание экспериментальной установки представлено в работе [14].

На рис.1 показаны расчётные и экспериментальные спектры угловой селективности пропускающих голограмм, записанных на ГФМ-КС с оптической плотностью 0,8 и 1,7 при физической толщине T_{ϕ} слоя образцов 30 мкм ($\lambda = 639$ нм). Расчеты проводились с использованием известной теории Когельника [15]. На основании наложения экспериментальных и теоретических графиков видно, что значение эффективной толщины $T_{\text{эф}}$ голограмм уменьшается с 25 мкм до 20 мкм, а модуляция коэффициента преломления n_1 увеличивается с 0,006 до 0,01 при увеличении D .

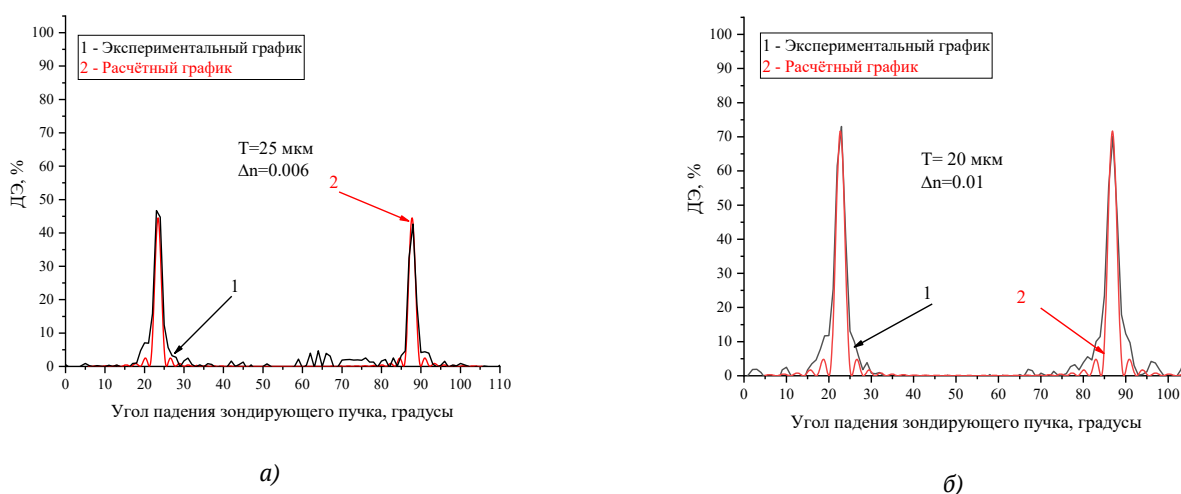


Рис. 1. Спектр угловой селективности пропускающих голограмм с оптической плотностью 0,8 (а) и 1,7 (б)

На рис. 2 показан расчётный и экспериментальный графики угловой селективности пропускающей голограммы с использованием ГФМ-КПЗ, для которых при T_{ϕ} образцов 50 мкм оптическая плотность оставляла 0,05 ($\lambda = 532$ нм). Из графиков видно, что $T_{\text{эф}} = 50$ мкм и $n_1 = 0,0021$. Наличие боковых лепестков в графике контура угловой селективности

свидетельствует об однородности пространственной структуры голографической решетки. Следует отметить, что физическая и эффективная толщины слоя совпадают.

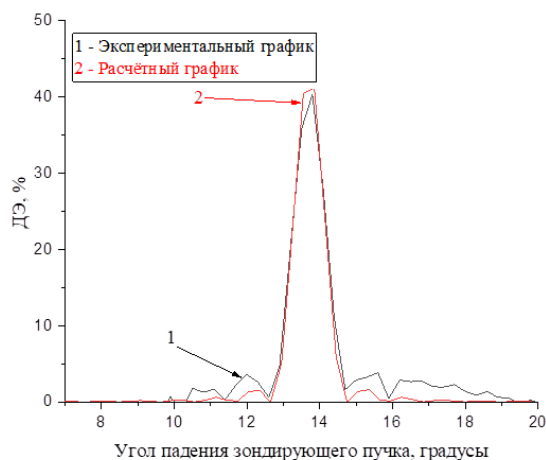


Рис. 2. Спектр угловой селективности пропускающей голограммы с использованием КПЗ

Заключение

Исследована зависимость эффективной толщины голограмм от оптической плотности слоя. Показано, что при увеличении оптической плотности слоя с 0.8 до 1.7 происходит уменьшение эффективной толщины голограммы с 25 мкм до 20 мкм. В то же время использование КПЗ позволяет записывать голограммы, у которых физическая и эффективная толщины слоя совпадают.

Благодарность

Работа выполнена в рамках госзадания «Научные основы синтеза гибридных соединений и создания функциональных материалов и полимеров для оптики, электроники, сенсорики» (AAAA-A21-121011490013-7).

Список источников

- [1] **Tork, A.** New photopolymer materials for holographic data storage / A. Tork, P. Pilot, T.V. Galstian // Optical Data Storage. Conference Digest. — 2000. — P. 138–140. — DOI:10.1109/ODS.2000.848006.
- [2] **Neipp, C.** Optimization of Photopolymer Materials for the Fabrication of a Holographic Waveguide / C. Neipp, J. Francés, F. J. Martínez, R. Fernández, M. L. Alvarez, S. Bleda, M. Ortuño, S. Gallego // Polymers. — 2017. — Vol. 9. — № 9 — P. 395. — DOI:10.3390/polym9090395.
- [3] **Liu, T.** High-fidelity multiplexing meta-hologram for information display, storage and encryption / T. Liu, W. Li, Y. Meng, W. Tang, H. Ma, X. Li, R. Zhu, C. Liu, H. Zhang, J. Wang, S. Qu // Materials & Design. — 2022. — Vol. 224. — P. 111353. — DOI:10.1016/j.matdes.2022.111353.
- [4] **Zhu, J.** Multiplexing Perfect Optical Vortex for Holographic Data Storage / J. Zhu, F. Zou, L. Wang, X. Lu, S. Zhao // Photonics. — 2023. — Vol. 10. — P. 720. — DOI:10.3390/photonics10070720.
- [5] **Peng, W.-T.** Novel materials and devices bring new opportunities for holographic display / W.-T. Peng, J. Liu, X. Li, G.-L. Xue // Acta Physica Sinica (Chinese Edition). — 2018. — Vol. 67. — № 2 — DOI:10.7498/aps.67.20172026.

- [6] **Shelkovnikov, V. V.** Optimal optical density of the absorbing holographic materials / V. V. Shelkovnikov, E. F. Pen, V. I. Kovalevsky // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. — 2007. — Vol. 16. — № 2 — P. 75–83. — DOI:10.3103/s1060992x07020038
- [7] **Gallego, S.** Physical and effective optical thickness of holographic diffraction gratings recorded in photopolymers / S. Gallego, M. Ortuño, C. Neipp, A. Márquez, A. Beléndez, I. Pascual, J. V. Kelly, J. T. Sheridan // *Optics Express*. — 2005. — Vol. 13. — № 6 — P. 1939–1947. — DOI:10.1364/OPEX.13.001939
- [8] **Derevyanko, D.I.** The Charge Transfer Complex Formed between the Components of Photopolymer Material as an Internal Sensitizer of Spectral Sensitivity / D. I. Derevyanko, V. V. Shelkovnikov, V. Y. Kovalski, I. L. Zilberberg, S. I. Aliev, N. A. Orlova, V. D. Ugozhaev // *ChemistrySelect*. — 2020. — Vol. 5. — № 38 — P. 11939–11947. DOI:10.1002/slct.202002163
- [9] **Garra, P.** Charge Transfer Complexes as Pan-Scaled Photoinitiating Systems: From 50 μm 3D Printed Polymers at 405 nm to Extremely Deep Photopolymerization (31 cm) / P. Garra, B. Graff, F. Morlet-Savary, C. Dietlin, J.-M. Becht, J.-P. Fouassier, J. Lalevée. // *Macromolecules*. — 2017. — Vol. 51. — № 1. — P. 57–70. — DOI:10.1021/acs.macromol.7b02185
- [10] **Gallego, S.** Improved maximum uniformity and capacity of multiple holograms recorded in absorbent photopolymers / S. Gallego, M. F. Ortuño, C. Neipp, E. Fernández, A. Beléndez, I. Pascual // *Optics express*. — 2007. — Vol. 15. — P. 9308–9319. — DOI:10.1364/OE.15.009308
- [11] **Gallego, S.** Physical and effective optical thickness of holographic diffraction gratings recorded in photopolymers / S. Gallego, M. F. Ortuño, C. Neipp, A. Márquez, A. Beléndez, // *Optics express*. — 2005. — Vol. 13. — № 6. — P. 1939–1947. — DOI:10.1364/OPEX.13.001939
- [12] **Патент № 25 523 51 РФ.** Фотополимерные композиции для записи отражательных голограмм в широком спектральном диапазоне / В. В. Шелковников, Е. Ф. Пен, Е. В. Васильев, В. В. Русских, Л. В. Эктова. — Оpubл. 10.06.2015.
- [13] **Шелковников, В. В.** Влияние термической пост-обработки на спектральные сдвиги фотополимерных отражательных голограмм и её использование для получения цветоделённых изображений. / В. В. Шелковников, Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен. // *Оптика и спектроскопия*. — 2022. — Том 130. — № 5. — С. 1559–1566. — DOI:10.21883/OS.2022.10.53626.3795-22.
- [14] **Деревянко, Д. И.** Запись монохромных и цветных голограмм в фотополимерном материале с использованием боратсульфониевого комплекса с переносом заряда / Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников, В. В. Бардин // *HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов*. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 322–329.
- [15] **Kogelnik, H.** Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings / H. Kogelnik // *The Bell System Technical Journal*. — 1969. — Vol. 48. — № 9. — P. 2909–2947.

Effective Thickness of Transmissive Holograms in Photopolymer Materials

S. I. Aliev¹, D. I. Derevianko¹, E. F. Pen², V. V. Shelkovnikov¹

¹ N.N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

Transmissive volumetric elementary holograms were recorded using holographic photopolymer materials (HPM) based on two types of photoinitiating systems: co-initiator dye (CD) and charge-transfer sulfonium-borate complex (CTC). It was found that for the HPM-CD, an increase in the optical density from 0.8 to 1.7 led to a decrease in the effective thickness of the transmission hologram from 25 to 20 μm . Thick transmissive holograms with the same effective and physical thicknesses of $\sim 50 \mu\text{m}$ were formed in the HPM-CTC, the modulation of the refractive index was ~ 0.002 , and the presence of side lobes in the angular selectivity contour indicates that the hologram was recorded uniformly over the layer thickness.

Keywords: Holography, Effective thickness of holograms, Photopolymer materials.

Влияние пост-экспозиционной термической обработки на свойства фазовых голографических решёток

С. И. Алиев¹, Д. И. Деревянко¹, Е. Ф. Пен², В.В. Шелковников¹

¹ Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск, Россия

Исследовано влияние термической пост-обработки на спектральные свойства фотополимерных отражательных голограмм, имеющих толщину слоя 10 мкм и 30 мкм. Пост-термообработка голограмм с толщиной слоя 10 мкм привела к уменьшению эффективной толщины с 8,5 мкм до 6,5 мкм и увеличению модуляции коэффициента преломления с 0,014 до 0,022, в то время как, для голограмм с толщиной слоя 30 мкм, эффективная толщина уменьшилась с 30 мкм до 12 мкм, а модуляция коэффициента преломления увеличилась с 0,006 до 0,017.

Ключевые слова: Голография, Фотополимерные материалы, Эффективная толщина голограмм, Модуляция коэффициента преломления.

Цитирование: Алиев, С. И. Влияние пост-экспозиционной термической обработки на свойства фазовых голографических решёток / С. И. Алиев, Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 459–463.

Введение

На сегодняшний день активно разрабатываются и исследуются голографические фотополимерные материалы (ГФМ) [1, 2], которые используются в защитной голографии, системах хранения информации, голографических дисплеях [3 – 5]. Много внимания уделяется разработке голографических сенсоров для контроля влажности и температуры [6]. В связи с этим актуальной задачей является изучение пост-экспозиционных процессов в ГФМ при изменении внешних условий. Например, в работе [7] в результате пост-экспозиционной термической обработки авторы наблюдали диффузионное усиление голограмм, записанных в фотополимере типа Реоксан, и рост значений дифракционной эффективности с 20 % до 99 %. В другой работе [8] авторы наблюдают увеличение степени конверсии двойных связей мономера в фотополимерном материале в результате пост-экспозиционной обработки. В то же время изменению эффективной толщины голограммы и модуляции коэффициента преломления ГФМ при термической пост-экспозиционной обработке уделено мало внимания.

Целью данной работы является определение зависимости изменения эффективной толщины и модуляции коэффициента преломления ГФМ с разной физической толщиной от времени пост-экспозиционной термообработки при заданной температуре.

Экспериментальная часть

В работе использован фотополимерный материал на основе акриламидного мономера и поливинилацетата [9]. Методика приготовления образцов описана в работе [10]. Все образцы покрывались защитной плёнкой.

Запись отражательных голограмм проводили с использованием лазерного излучения с длиной волны 639 нм, плотность мощности излучения составила $20 \text{ мВт} \times \text{см}^{-2}$.

Экспериментальные значения дифракционной эффективности (ДЭ) отражательных голограмм оценивались по формуле:

$$\eta_r = (1 - T_r/T_0) \cdot 100\%,$$

где T_r — пропускание голограммы на длине волны максимума спектрального отклика, T_0 — остаточное пропускание образца вне участка голограммы.

Известно, что в ГФМ в процессе записи голограмм и их постобработки вследствие физико-химических процессов происходит изменение толщины регистрирующего слоя, получившее общепринятое название — усадка [11].

Степень усадки ΔS оценивают по относительному сдвигу спектрального отклика отражательной голограммы по формуле:

$$\Delta S = \frac{\lambda_{исх} - \lambda_{ус}}{\lambda_{исх}} \cdot 100\%,$$

где $\lambda_{исх}$ — длина волны максимума спектрального отклика отражательной голограммы сразу после записи, $\lambda_{ус}$ — длина волны максимума этого отклика в результате пост-обработки.

Получение значений эффективной толщины ($T_{эф}$) и модуляции коэффициента преломления (n_l) записанных голограмм осуществляли путём сопоставления экспериментального и расчетного спектра с подгонкой параметров, удовлетворяющих их наибольшему сходству.

На рис.1 представлено изменение спектрального отклика голограммы с физической толщиной слоя 10 мкм при нагреве с температурой 50 °С. В результате пост-обработки через 18 ч. нагрева $T_{эф}$ уменьшилась с 8,5 мкм до 6,5 мкм, а n_l увеличилась с 0,014 до 0,022. Видно, что через 10 мин. нагрева ДЭ голограммы увеличилась с 10 % до 43 %, а через 18 ч. уменьшилась до 22 %. Также наблюдается уширение пика на полувысоте с 20 нм до 27 нм через 10 мин. и 18 ч. соответственно. Значение $\Delta S = 3$ %. Можно предположить, что пост-экспозиционная термообработка приводит к дополнительной сшивке непрореагировавшего мономера, из-за чего происходит увеличение n_l , вследствие чего увеличивается и ДЭ в первые 10 мин. нагрева.

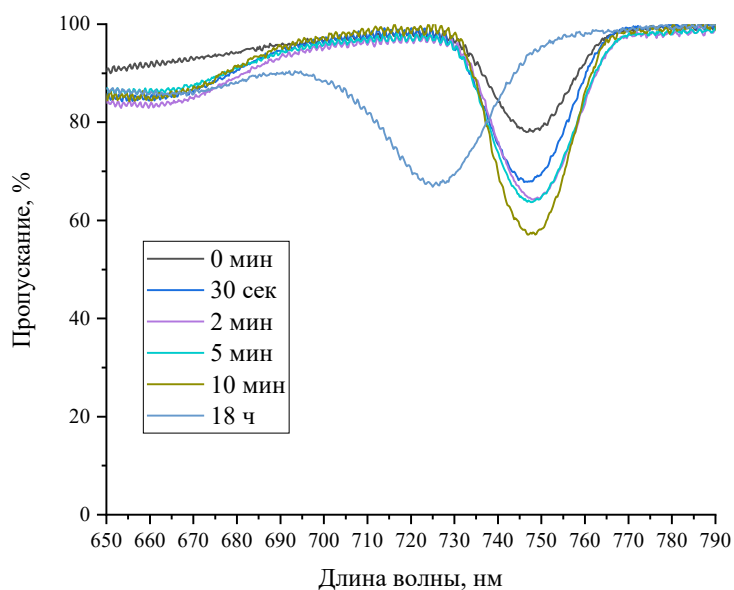


Рис. 1. График спектров пропускания голограммы толщиной 10 мкм при различном времени термообработки

На рис. 2 представлено изменение спектрального отклика голограммы с толщиной слоя 30 мкм при нагреве 50 °С. Записанная голограмма имеет $T_{эф} = 30$ мкм, $n_1 = 0.006$ и значение ДЭ = 60 %. С увеличением времени нагрева до 18 ч. значение $T_{эф}$ уменьшилось до 12 мкм, значение n_1 увеличилось до 0,017, а ДЭ в максимуме составила 75 % через 3 часа нагрева. Также наблюдается уширение пика на полувысоте с 12 нм до 32 нм. Значение $\Delta S = 1,5$ %.

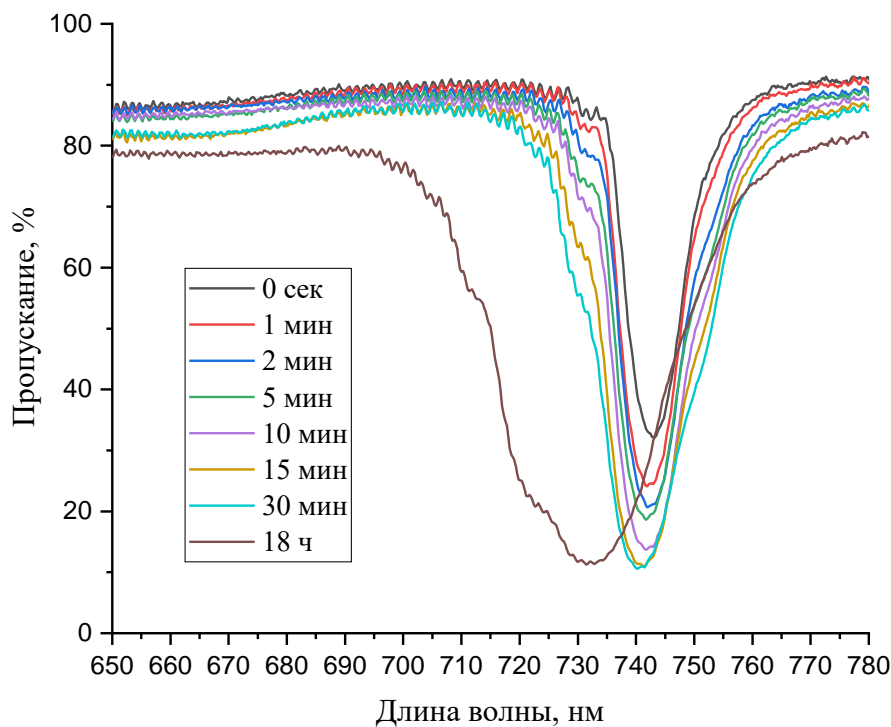


Рис. 2. График спектров пропускания голограммы толщиной 30 мкм при различном времени термообработки

Из полученных данных можно предположить, что в результате нагрева при 50 °С на протяжении 10-30 минут, в зависимости от толщины ГФПМ, происходит диффузионное усиление голограмм за счет раскрытия непрореагировавших двойных связей мономера. Дальнейший нагрев приводит к уширению спектральных откликов записанных голограмм и уменьшению эффективной толщины. Вероятно, что в результате длительной пост-экспозиционной термической обработки ГФМ с нанесенной защитной пленкой, происходит снятия напряжения в матрице по иному механизму, чем в случае длительной пост-обработки образцов без защитной пленки. Так в работе [10] авторы наблюдали появление дополнительной усадки вплоть до 20 % без явного увеличения ширины на полувысоте. В то же время, как отмечено выше, усадка голограмм с нанесенной защитной плёнкой составила не более 3 %. Следует отметить, что создание модели пост-экспозиционных процессов в ГФПМ является предметом дальнейших исследований.

Заключение

Исследовано влияние термической пост-экспозиционной обработки на свойства фазовых пропускающих голограмм. Установлено, что пост-экспозиционная термообработка при 50 °С в течение 18 часов в случае голограмм с толщиной слоя 10 мкм привела к уменьшению эффективной толщины с 8,5 мкм до 6.5 мкм и увеличению модуляции коэффициента преломления с 0,014 до 0,022. В то же время для голограмм с толщиной слоя 30 мкм эффективная толщина уменьшилась с 30 мкм до 12 мкм, а модуляция коэффициента преломления увеличилась с 0,006 до 0,017. Также обнаружено уширение контура спектрального отклика с 20 нм до 27 нм и с 12 нм до 32 нм для голограмм с толщиной 10 мкм и 30 мкм соответственно.

Благодарность

Работа выполнена в рамках госзадания «Научные основы синтеза гибридных соединений и создания функциональных материалов и полимеров для оптики, электроники, сенсорики» (AAAA-A21-121011490013-7).

Список источников

- [1] **Tork, A.** New photopolymer materials for holographic data storage / A. Tork, P. Pilot, T.V. Galstian // 2000 Optical Data Storage. Conference Digest — 2000. — P. 138–140. — DOI:10.1109/ODS.2000.848006.
- [2] **Neipp, C.** Optimization of Photopolymer Materials for the Fabrication of a Holographic Waveguide / C. Neipp, J. Francés, F. J. Martínez, R. Fernández, M. L. Alvarez, S. Bleda, M. Ortuño, S. Gallego // Polymers. — 2017. — Vol. 9. — № 9 — P. 395. — DOI:10.3390/polym9090395.
- [3] **Liu, T.** High-fidelity multiplexing meta-hologram for information display, storage and encryption / T. Liu, W. Li, Y. Meng, W. Tang, H. Ma, X. Li, R. Zhu, C. Liu, H. Zhang, J. Wang, S. Qu // Materials & Design. — 2022. — Vol. 224. — P. 111353. — DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111353.
- [4] **Zhu, J.** Multiplexing Perfect Optical Vortex for Holographic Data Storage / J. Zhu, F. Zou, L. Wang, X. Lu, S. Zhao // Photonics. — 2023. — Vol. 10. — P. 720. — DOI:10.3390/photonics10070720.

- [5] **Peng, W.-T.** Novel materials and devices bring new opportunities for holographic display / W.-T. Peng, J. Liu, X. Li, G.-L. Xue // *Acta Physica Sinica (Chinese Edition)*. — 2018. — Vol. 67. — № 2 — DOI: 10.7498/aps.67.20172026.
- [6] **Mikulchyk, T.** Development of holographic sensors for monitoring relative humidity and temperature / T. Mikulchyk // *Doctoral Thesis. Technological University Dublin*. — 2016. — DOI:10.21427/D7HS3X.
- [7] **Вениаминов А. В.** Усиление голограмм за счет диффузионной деструкции противofазных периодических структур / А. В. Вениаминов, В. Ф. Гончаров, А. П. Попов // *Оптика и спектроскопия*. — 1991. — Том 70. — № 4. — С. 864–869.
- [8] **Деревянко Д. И.** Гибридный фотополимерный материал на основе (8-акрилоил-1,4-дитиа-8-азаспиро[4.5]декан-2-ил)метил акрилата и тиол-силоксанового компонента для записи микроструктур: синтез, оптические и термомеханические свойства / Д. И. Деревянко, В. С. Басистый, В. В. Шелковников, И. К. Шундрин, А. Д. Бухтоярова, Г. Е. Сальников, В. Н. Бережная, А. А. Чернонос // *Высокомолекулярные соединения (серия Б)*. — 2020. — Том 62. — № 5. — С. 382–394. — DOI:10.31857/S2308113920050046.
- [9] **Патент № 25 523 51 РФ.** Фотополимерные композиции для записи отражательных голограмм в широком спектральном диапазоне / В. В. Шелковников, Е. Ф. Пен, Е. В. Васильев, В. В. Русских, Л. В. Эктова. — Оpubл. 10.06.2015.
- [10] **Шелковников В. В.** Влияние термической пост-обработки на спектральные сдвиги фотополимерных отражательных голограмм и её использование для получения цветоделённых изображений. / В. В. Шелковников, Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен. // *Оптика и спектроскопия*. — 2022. — Том 130. — № 5. — С. 1559-1566. — DOI:10.21883/OS.2022.10.53626.3795-22.
- [11] **Gallo, J. T.** Model for the effects of material shrinkage on volume holograms / J. T. Gallo, C. M. Verbe // *Applied Optics*. — 1994. — Vol. 33. — № 29. — P.6797–6804. DOI:10.1364/AO.33.006797

Influence of post-exposure heat treatment on the properties of phase holographic gratings

S. I. Aliev¹, D. I. Derevianko¹, E. F. Pen², V. V. Shelkovnikov¹

¹ N. N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

The effect of thermal post-processing on the spectral properties of photopolymer reflective holograms with a layer thickness of 10 μm and 30 μm has been studied. Such post-processing of holograms with a layer thickness of 10 μm led to a decrease in the effective thickness from 8.5 μm to 6.5 μm and an increase in the modulation of the refractive index from 0.014 to 0.022, while for holograms with a layer thickness of 30 μm , the effective thickness decreased from 30 μm to 12 μm , and the modulation of the refractive index increased from 0.006 to 0.017.

Keywords: Holography, Photopolymer materials, Effective thickness of holograms, Refractive index modulation.

Фотохромные свойства пленки Биохром после 30-летней консервации

Ю. Д. Лантух

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

В работе представлены предварительные результаты исследования фотохромных свойств регистрирующего материала на основе бактериального родопсина (пленка «Биохром-БМ») после продолжительного (около 30 лет) хранения. При облучении непрерывными лазерами с $\lambda = 532$ нм или $\lambda = 633$ нм происходит просветление образца. Восстановление окраски происходит за минуты. Записывались динамические голографические решетки наведенного просветления с периодом ~ 10 мкм. Дифракционная эффективность при записи на длине волны 633 нм порядка 10^{-4} , а на длине волны 532 нм примерно 10^{-5} и уменьшается со временем.

Ключевые слова: Фотохромизм, Биохром, Голографические решетки.

Цитирование: Лантух, Ю. Д. Фотохромные свойства пленки Биохром после 30-летней консервации / Ю. Д. Лантух // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 464–467.

Введение

Интерес к реверсивным оптическим регистрирующим средам обусловлен использованием последних в системах оптической обработки информации. Биологические регистрирующие среды, в том числе пленки на основе светочувствительного белка бактериородопсина (БР), обладающие повышенными разрешающей способностью, чувствительностью и цикличностью, интенсивно изучались в последнюю четверть 20 века. Актуальность исследования таких сред сохраняется и в настоящее время [1].

В работе приведены предварительные результаты исследования фотохромных свойств образца регистрирующего материала на основе бактериального родопсина после продолжительного (около 30 лет) хранения. Пленочный образец («Биохром-БМ», НПК «Поиск», Москва) использовался авторами в учебных целях в 90-х годах прошлого века. Фото образца, условия хранения которого далеко не всегда были комнатными, представлено на рис. 1.



Рис. 1. Пленка «Биохром-БМ».

Спектры поглощения пленок регистрировали на оптоволоконном спектрометре AvaSpec 2048 (Avantes), работающем в режиме полихроматора.

Спектр поглощения (рис. 2) образца (светоадаптированная форма) имеет максимум при 558 нм и в целом совпадает с приведенными в литературе [2]. За время хранения оптическая плотность образца уменьшилась примерно на 15 %.

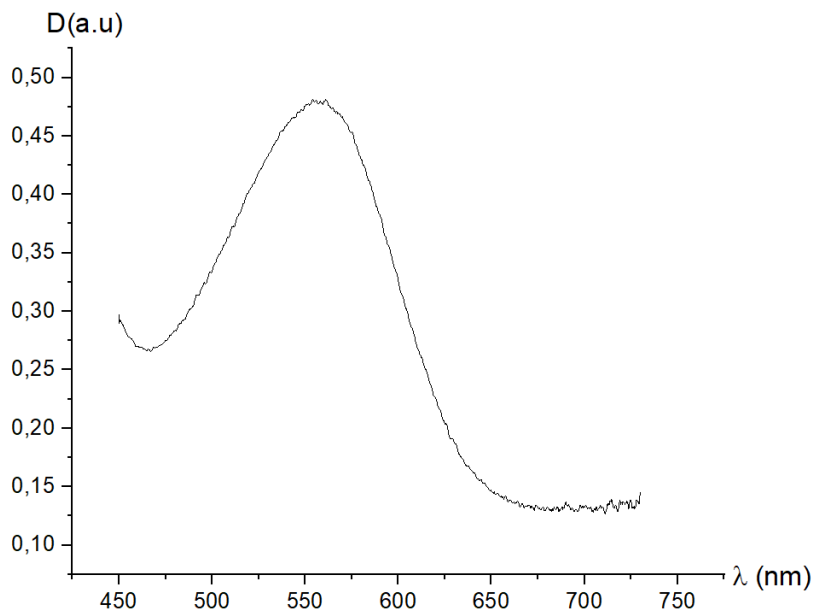


Рис. 2. Спектр поглощения образца пленки «Биохром-БМ».

При облучении непрерывными лазерами с $\lambda = 532$ нм или $\lambda = 633$ нм имеет место просветление образца. Восстановление окраски происходит за минуты. Динамика восстановления окраски образца после облучения лазером с $\lambda = 532$ нм мощностью 5 мВт в течение 5 секунд представлена на рис. 3. Кинетическая кривая восстановления оптической плотности при $\lambda = 560$ нм близка к экспоненциальному виду.

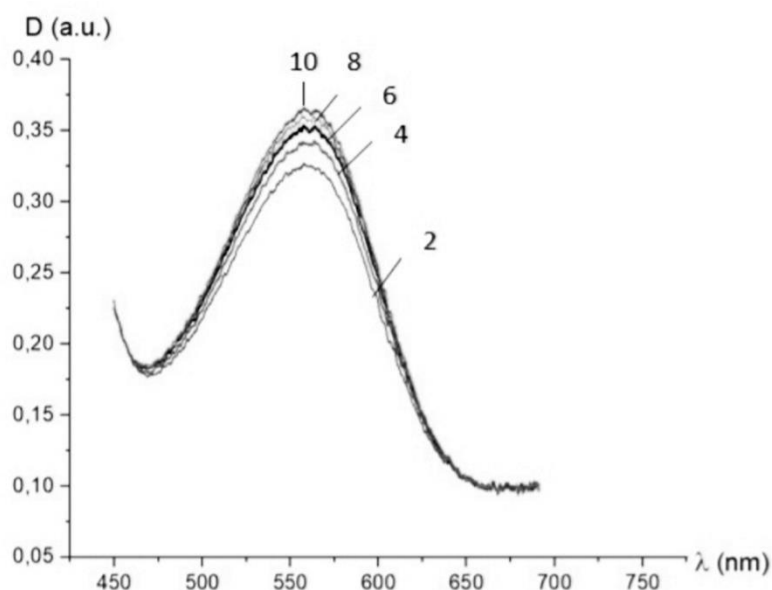


Рис. 3. Динамика восстановления окраски образца после облучения с $\lambda = 532$ нм. Кривые 2 – 10 получены с интервалом 2 секунды.

Для записи голографических решеток использовали DPSS cw лазер KLM-532/SLN (532 нм) и гелий-неоновый лазер ЛГН-222 (633 нм) (Полярон).

Голографические решетки записывались по схеме в попутных пучках (равной интенсивности) [3] с периодом 10 мкм. Плотность мощности лазерного излучения в зоне записи решеток составляла порядка 10^{-2} Вт/см².

Тип записи – динамические плоские амплитудные решетки наведенного просветления. Измерялся сигнал самодифракции в первом порядке. В качестве измерителя энергетических параметров лазерных пучков использовали прибор FieldMaster GS (Coherent).

Дифракционная эффективность (ДЭ) при записи на длине волны 633 нм порядка 10^{-4} .

При записи на $\lambda = 532$ нм ДЭ примерно 10^{-5} и уменьшается со временем. По нашему мнению одной из причин такого поведения решеток это попадание $\lambda = 532$ нм в край полосы поглощения «синей» формы БР, что ускоряет регенерацию исходной формы.

Следует отметить, что поле волн, восстановленных образцом, характеризуется повышенным уровнем рассеянного света (шума), что может свидетельствовать о частичном разрушении исходной структуры материала.

Таким образом, в работе показано, что основные характеристики образца регистрирующего материала на основе бактериального родопсина (пленка «Биохром-БМ») после продолжительного (около 30 лет) хранения в целом сохраняются. И такая «рекордная долговечность», втрое превышающая заявленный срок службы видимо не является предельной.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, проект № FSGU-2023-0003.

Список источников

- [1] **Дружко А.Б.** Бактериородопсин: фундаментальные аспекты и возможности для практического применения / А.Б. Дружко — М.: РАН, 2022. — 92 с.
- [2] **Всеволодов Н.Н.** Биопигменты – фоторегистраторы: фотоматериал на бактериородопсине / Н. Н. Всеволодов — М.: Наука, 1988. — 224 с.
- [3] **Лантух Ю.Д.** Использование среды тиазинный краситель – поливиниловый спирт для записи голограмм / Ю.Д. Лантух, Г.А. Кецле, С.Н. Пашкевич //Оптический Журнал.— 2006.— Том 73.— № 7.— С. 70–74.

Photochromic properties of Biochrom film after 30 years of preservation.

Yu. D. Lantukh

Orenburg State University, Orenburg, Russia

The paper presents preliminary results of a study of the photochromic properties of a recording material based on bacterial rhodopsin (Biochrom-BM film) after long-term (about 30 years) storage. When irradiated with continuous lasers with $\lambda = 532$ nm or $\lambda = 633$ nm, the sample is bleached. Color restoration occurs in minutes. Dynamic holographic gratings of induced transmission with a period of ~ 10 μm were recorded. The diffraction efficiency when recording at a wavelength of 633 nm is about 10^{-4} , and at a wavelength of 532 nm it is about 10^{-5} and decreases with time.

Keywords: Photochromism, Biochrom, Holographic gratings.

Голографическая решетка с люминесцирующими наночастицами, сформированная в результате фотоиндуцированной диффузии

Л. Н. Бородина, В. Н. Борисов, А. О. Орлова, А. В. Вениаминов

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Периодическая структура (решетка) сформирована в результате голографической записи и прямой записи лазерным лучом за счет фотоиндуцированной диффузии в мономерной композиции с люминесцентными наночастицами. Чтобы обеспечить полную совместимость наночастиц с окружающей средой, в качестве стабилизатора их поверхности использованы молекулы мономера. Отсутствие как микро-, так и наноразмерных агрегатов доказано методами стационарной и времяразрешённой лазерной сканирующей микроскопии. Для изучения диффузии люминесцентных наночастиц и определения их гидродинамических размеров был использован метод восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания Stripe FRAP, позволяющий изучать их фотоиндуцированные изменения под действием лазерного излучения. Люминесцирующие решетки рассматриваются как кандидаты на роль гибридных дифракционно-люминесцентных сенсорных элементов.

Ключевые слова: Голографическая решетка, Фотополимеризация, Диффузия, Фотолюминесценция, Лазерная сканирующая микроскопия, Углеродные точки.

Цитирование: **Бородина, Л. Н.** Голографическая решетка с люминесцирующими наночастицами, сформированная в результате фотоиндуцированной диффузии / Л. Н. Бородина, В. Н. Борисов, А. О. Орлова, А. В. Вениаминов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 468–472.

Введение

Полупроводниковые коллоидные квантовые точки (КТ) [1] и углеродные точки (УТ) [2] обладают такими выдающимися свойствами, как высокий квантовый выход фотолюминесценции, фотостабильность, высокий показатель преломления по сравнению с большинством оптических фотополимеров.

Фотополимеризуемые композиции, включающие подобные люминесцирующие наноструктуры, могут быть использованы для создания голографических оптических элементов, лазеров с распределенной обратной связью и дифракционно-люминесцентных сенсоров [3,4]. Но любая агрегация наноструктур при создании голографических элементов может привести к снижению их квантового выхода фотолюминесценции и дифракционной эффективности.

В настоящей работе проведена стабилизация поверхности КТ молекулами мономера для предотвращения их агрегации, и с помощью средств лазерной сканирующей микроскопии доказано отсутствие агрегатов как микро- так и нанометрового размера.

Материалы и методы

Композицию, состоящую из мономера 2-карбоксииэтилакрилата (Aldrich № 552348), полупроводниковых коллоидных КТ CdSe/ZnS и фотоинициатора Irgacure 784, помещали между предметным и покровным стеклами. В процессе голографической записи с помощью Nd:YAG DPSS-лазера с длиной волны 532 нм в результате пространственно-неоднородной фотополимеризации в образце нанокompозита была сформирована пропускающая решетка с пространственным периодом 2,5 мкм.

Локальное пропускание и люминесценцию измеряли с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа LSM 710 (Carl Zeiss) в свете полупроводникового лазера с длиной волны 405 нм. Затухание люминесценции КТ в голографической решетке контролировали с помощью лазерного сканирующего микроскопа MicroTime 100 (PicoQuant).

Для изучения диффузии люминесцентных наночастиц и определения их гидродинамических размеров использовалась техника исследования подвижности люминесцирующих наноструктур Stripe Fluorescence Recovery After Photobleaching (sFRAP, Stripe FRAP) является развитием метода FRAP [5], суть которого состоит в локальном фотоиндуцированном изменении эффективности люминесценции микроскопической области образца с последующим отслеживанием изменения интенсивности люминесценции в этой области за счёт перераспределения в пространстве частиц с изменённой и исходной интенсивностью люминесценции. Метод Stripe FRAP [6] состоит в (1) экспонировании лазерным лучом узкой полосы в коллоидном растворе люминесцирующих частиц, которое приводит к изменению квантового выхода их люминесценции, (2) отслеживании картины люминесценции, которая изменяется в результате диффузионного перемешивания экспонированных и неэкспонированных частиц, в результате которого полоса расплывается, (3) анализе в простейшем случае линейной зависимости квадрата ширины поперечного профиля интенсивности люминесценции от времени, наклон которой пропорционален коэффициенту диффузии и соответственно обратно пропорционален радиусу частицы, согласно соотношению Стокса-Эйнштейна.

Результаты и обсуждения

Для обеспечения совместимости КТ с окружающей средой исходный стабилизатор на их поверхности заменили на молекулы мономера, который использовали для создания фотополимеризующейся композиции.

В результате голографической записи была сформирована периодическая структура с КТ, которая показана на (рис. 1). Объемное изображение голографической решетки подтверждает отсутствие агрегатов КТ микронных размеров. На рис. 2 показаны соответствующие профили интенсивности фотолюминесценции и проходящего света вдоль вектора решетки, в которых максимумы относятся к областям высокой концентрации КТ, возникающим в результате фотоиндуцированной диффузии нанокристаллов.

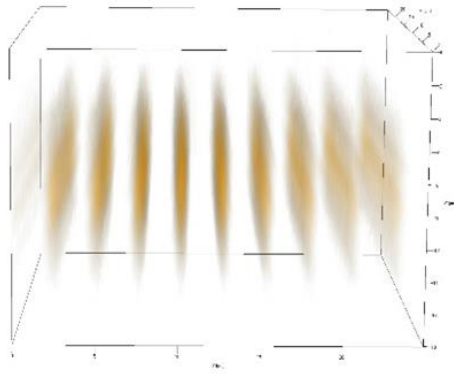


Рис. 1. Объемное изображение решетки с КТ толщиной 10 мкм, полученное с помощью лазерного сканирующего микроскопа LSM 710 при сканировании по трем координатам лазерным излучением с длиной волны 405 нм

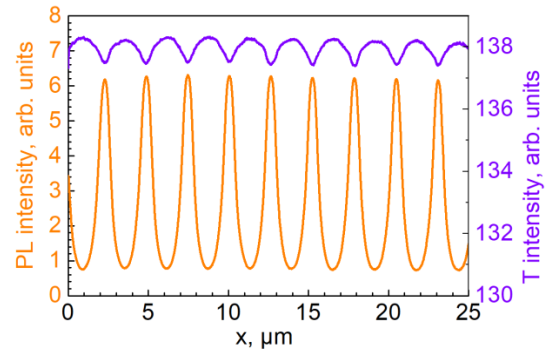


Рис. 2. Профили интенсивности фотолюминесценции и проходящего света (405 нм) вдоль вектора голографической решетки

Пространственное распределение времен затухания люминесценции, форма которого несколько отличается от люминесцентного вида решетки (рис. 3), свидетельствует о различных временах затухания люминесценции в областях высокой и низкой концентрации КТ в голограмме, а значит, возможном переносе энергии и агрегации. Однако кажущийся долговременный вклад более вероятен из-за относительно высокого шума в более темных областях, а отсутствие зависимости времени затухания люминесценции от длины волны не зависит от концентрации КТ (рис. 4) и свидетельствует о незначительной эффективности переноса энергии по механизму Фёрстера, и, следовательно, об отсутствии агрегации нанокристаллов.

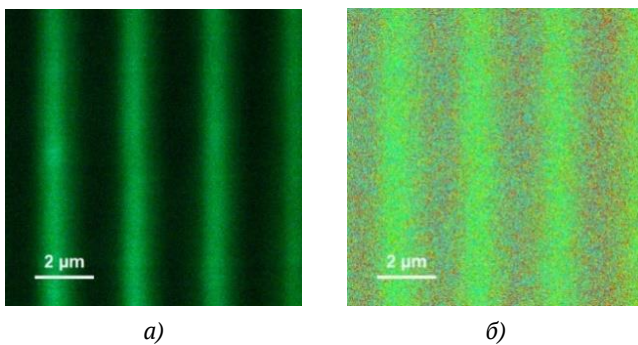


Рис. 3. Люминесцентное изображение (а) и времяразрешенное изображение (б) решетки с КТ

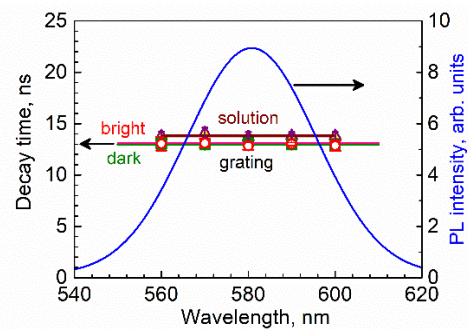


Рис. 4. Зависимость средних времен затухания люминесценции от длины волны регистрации в полосе люминесценции КТ

Заключение

С помощью стационарной и времяразрешенной люминесцентной лазерной сканирующей микроскопии исследована периодическая структура с регулярным пространственным распределением КТ, возникающих в результате интерференционной записи, фотополимеризации и фотоиндуцированной диффузии. Одно и то же вещество

использовалось как в качестве стабилизатора поверхности нанокристаллов, так и в качестве фотополимеризуемого мономера для лучшей совместимости КТ с окружающей средой. Микроскопическая люминесцентная визуализация периодической структуры подтвердило отсутствие агрегатов микрометрового масштаба, а отсутствие спектральной зависимости времени затухания люминесценции свидетельствует о какой-либо агрегации КТ в областях как высокой, так и низкой их концентрации.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, госзадание № 2019- 1080 и гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список источников

- [1] **Resch-Genger, U.** Quantum dots versus organic dyes as fluorescent labels / U. Resch-Genger et al. // Nature methods. — 2008. — Vol. 5. — №. 9. — P. 763–3775.
- [2] **Liu, J.** Carbon dots: A new type of carbon-based nanomaterial with wide applications / J. Liu, R. Li, B. Yang // ACS Central Science. — 2020. — Vol. 6. — №. 12. — P. 2179–32195.
- [3] **Davies, S.** Holographic sensors in biotechnology / S. Davies et al. // Advanced Functional Materials. — 2021. — Vol. 31. — №. 47. — P. 2105645.
- [4] **Borodina, L. N.** Nanostructured Luminescent Gratings for Sensorics / L. N. Borodina et al. // Materials. — 2022. — Vol. 15. — №. 22. — P. 8195.
- [5] **Hashlamoun, K.** Fluorescence recovery after photobleaching: direct measurement of diffusion anisotropy / K. Hashlamoun et al. // Biomechanics and Modeling in Mechanobiology. — 2020. — Vol. 19. — №. 6. — P. 2397–2412.
- [6] **Бородина, Л. Н.** Фотоиндуцированное изменение коэффициента диффузии люминесцирующих нанокристаллов в лазерной сканирующей микроскопии / Л. Н. Бородина, А. В. Вениаминов // XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов (Москва, 1-3 февраля 2023г.). — 2023. — С. 119–120.

Holographic grating with luminescent nanoparticles formed by photoinduced diffusion

L. Borodina, V. Borisov, A. Orlova, A. Veniaminov

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

A periodical pattern (grating) was formed by holographic recording and direct recording with a laser beam by photopolymerization-driven diffusion in a monomer composition with luminescent nanoparticles. To ensure full compatibility of nanoparticles with the surrounding, we used monomer molecules as surface stabilizer. The absence of either micro- or nanosized aggregates was proved by means of steady-state and time-resolved laser scanning microscopy. To study the diffusion of luminescent nanoparticles and determine their hydrodynamic sizes, we used the Stripe FRAP technique, which makes it possible also to study their photoinduced changes under laser radiation. The recorded luminescent gratings are considered candidates for the role of hybrid diffraction-luminescent sensor elements.

Keywords: Holographic grating, Photopolymerization, Diffusion, Photoluminescence, Laser scanning microscopy, Carbon dots.

Аналого-цифровое фотограмметрическое преобразование голографических изображений, записанных с нескольких ракурсов с угловым охватом 4π стерадиан

Е. В. Рабош, В. А. Коклюшкин, Н. С. Балбекин, Н. В. Петров

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Данная работа посвящена представлению теоретических и экспериментальных результатов в области аналого-цифрового фотограмметрического преобразования изображений голограмм с целью построения цифровой трехмерной модели объекта. Показано, что построение модели объекта, которая содержит достаточно информации о поверхности объекта, достигается за счет записи не менее четырех голограмм идентичного формата, при записи которых объект своими сторонами ориентируется параллельно граням охватывающего его воображаемого тетраэдра.

Ключевые слова: Изобразительная голография, фотограмметрия, аналого-цифровое преобразование, 3D-моделирование.

Цитирование: Рабош, Е. В. Аналого-цифровое фотограмметрическое преобразование голографических изображений, записанных с нескольких ракурсов с угловым охватом 4π стерадиан / Е. В. Рабош, В. А. Коклюшкин, Н. С. Балбекин, Н. В. Петров // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 473–477.

Введение

В серии наших работ [1, 2] была предложена фотограмметрия для аналого-цифрового преобразования информации, содержащейся в изобразительных голограммах. Фотограмметрия необходима в задачах получения цифрового образа, сформированного на основе серии фотографий. В настоящее время необходимое оборудование для проведения съемки, а также программное фотограмметрическое обеспечение легко доступны, что гарантирует получение высокоточных результатов. Так же, как и изобразительная аналоговая голография, фотограмметрия находит широкое применение в качестве инструмента для решения музейных задач [3, 4], в частности для реставрации памятников [5] и археологических объектов [6]. Процесс фотограмметрической оцифровки восстановленного голографического изображения состоит в том, что на цифровую матрицу фотоаппарата регистрируется набор ракурсов голографического изображения при смещении самого фотодетектора относительно голограммы.

1. Краткое описание применимости метода

Как нами было показано в работе [2], метод фотограмметрии используется в качестве инструмента оцифровки восстановленного объектного волнового фронта, записанного на отражательную голограмму. Однако при наличии самого физического объекта и в сравнении с ним его голографическое изображение представляет собой ограниченное количество

информации даже при максимально возможном угле обзора голограммы. Следовательно, одно голографическое изображение не может обеспечить восстановление максимально полной информации об объекте.

Максимальный угол обзора достигается за счет трансформации сцены, окружающей объект, относительно фотопластины, а также за счет использования подходящих по размеру фотопластинок. Чтобы достичь наибольший угол обзора голографического изображения, приведем значения в таблице 1, полученные по формуле (1) для различных форматов фотоматериалов, где h – линейный размер фотопластинки (мм), r_o – радиус объекта (мм), θ – величина угла обзора ($^\circ$), ρ_x – коэффициент заполнения объектом фотографической пластинки (%), N – количество голограмм ($N+1$ означает необходимый ракурс голографического изображения, записанного снизу объекта).

$$\theta = \arcsin\left(\frac{h^2 - 4r_o^2}{h^2 + 4r_o^2}\right), \quad (1)$$

где $r_+ = r_o + \Delta r$, Δr – расстояние от объекта до фотопластины.

Величина коэффициента заполняемости объектом голограммы вычисляется по формуле

$$\rho_x = \frac{2r_o}{h} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Таблица 1. Соотношение величины угла обзора голограммы, коэффициента заполняемости и количества голограмм, необходимых для получения полной информации

h = 102 мм				h = 130 мм			
r_o	θ	ρ_x	N+1	r_o	θ	ρ_x	N+1
10	131	19,6	4	10	141	15,3	4
20	86	39,2	6	20	105	30,7	5
30	48	58,8	9	30	72	46,1	6
40	16	78,4	22	40	43	61,5	10
50	-	> 100	-	50	19	76,9	20
h = 180 мм				h = 240 мм			
r_o	θ	ρ_x	N+1	r_o	θ	ρ_x	N+1
10	152	11,1	4	10	159	8,3	4
20	125	22,2	4	20	138	16,6	4
30	99	33,3	5	30	118	25	5
40	75	44,4	6	40	99	33,3	5
50	54	55,5	8	50	81	41,6	5

Таким образом, величины из правого столбца таблицы 1 дают представление о минимальном количестве голограмм для разных форматов пластин и объектов, запись которых позволит провести фотограмметрическую оцифровку полного объектного волнового фронта.

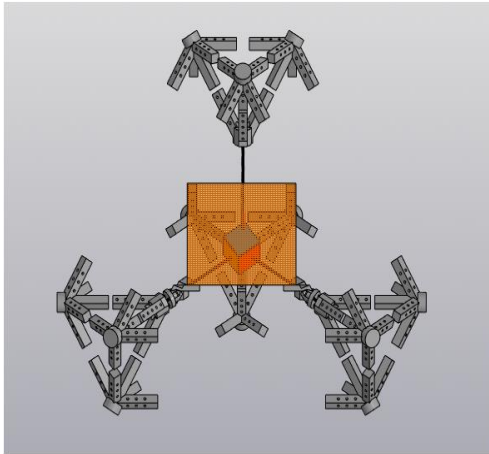
В докладе представлено техническое решение, которое открывает новые возможности для регистрации нескольких голографических изображений одного и того же объекта.

2. Разработка модуля для голографической записи объекта целиком

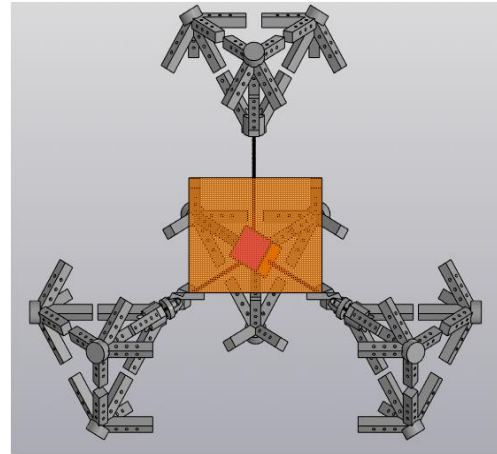
При фотограмметрической съемке следует перемещаться вокруг объекта купольным методом, регистрируя все ракурсы объекта при его равномерном освещении со всех сторон. Так, на стадии выравнивания всех фотографий в фотограмметрическом программном пакете вся серия фотоснимков формирует воображаемую полную сферу, которая, в свою очередь, представляет собой полный телесный угол и равняется 4π стерадиан. Соответственно, каждая фотография является своеобразным основанием конуса, угол вершины которого обозначается как телесный угол. При разработке макета, предназначенного для записи нескольких голографических изображений, было предложено охарактеризовать угол обзора восстановленного изображения как телесный угол.

На примере табличных данных (табл. 1) рассмотрим количество голограмм, равное четырем. В пересечении четырех конусов, задающих ракурсы наблюдения, образуется воображаемый тетраэдр, который задает плоскости для записи четырех записываемых голограмм, необходимых для построения цифровой трехмерной модели объекта, содержащей информацию о его поверхности, необходимую для полного представления ее с любого ракурса с угловым охватом 4π стерадиан.

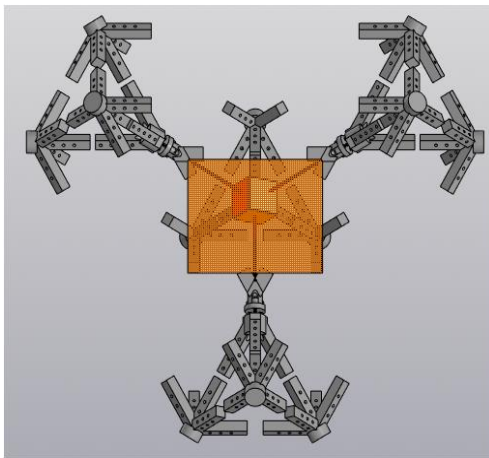
Моделирование макета для регистрации объектного волнового фронта выполнялось в программе КОМПАС-3D. Макет состоит из двух основных частей, связанных между собой: внешний каркас и внутренний полый каркас, представляющий воображаемый тетраэдр. Каркасы состоят из конструктивных элементов – пятиконечные и трехконечные кресты, двенадцать для внешнего каркаса и четыре для внутреннего, соответственно. Фотопластинки одинакового формата (10×12 см) укладываются на специальные лапки, имеющиеся у конструктивных элементов внутреннего каркаса в четырех плоскостях (рис. 1).



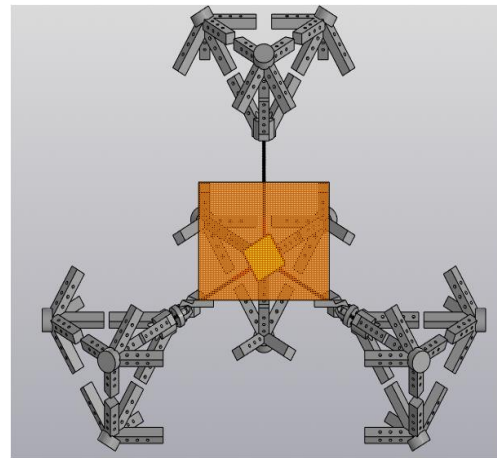
а) Ракурс № 1



б) Ракурс № 2



в) Ракурс № 3



г) Ракурс № 4

Рис. 1 (Продолжение). Проекция устанавливаемой фотопластинки на внешний каркас модуля для записи четырех голографических изображений

Заключение

Данная работа является продолжением исследований в области аналого-цифрового фотограмметрического преобразования изображений голограмм. Были представлены основные аргументы в пользу развития предлагаемой методики. Предложен модуль, разработанный для записи четырех аналоговых голограмм одинакового формата. Детали для позиционирования и крепления голографических пластинок изготовлены методом 3Д-печати. Предлагаемый модуль подходит для записи малогабаритных физических объектов, размеры которых не превышают линейных размеров фотопластин.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019–0903).

Список источников

- [1] **Rabosh, E. V.** Analog-to-digital conversion of information archived in display holograms: I. discussion / E. V. Rabosh, N. S. Balbekin, N. V. Petrov // Journal of the Optical Society of America. — 2023. — Vol. 40. — Issue 4. — P. 47–56. — DOI: 10.1364/JOSAA.478498.

- [2] **Rabosh, E. V.** Analog-to-digital conversion of information archived in display holograms: II. photogrammetric digitization / E. V. Rabosh, N. S. Balbekin, A. M. Timoshenkova, T. V. Shlykova, N. V. Petrov // Journal of the Optical Society of America. – 2023. – Vol. 40. – Issue 4. – P. 57–64. – DOI: 10.1364/JOSAA.478499.
- [3] **McCarthy, J.** Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement / J. McCarthy // Journal of Archaeological Science. – 2014. – Vol. 43 – P. 175–185. – DOI: 10.1016/j.jas.2014.01.010.
- [4] **Ballarin, M.** Replicas in cultural heritage: 3D printing and the museum experience / M. Ballarin, C. Balletti, P. Vernier // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2018. – Vol. 42 – P. 55–62. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-55-2018.
- [5] **Pavlidis, G.** Methods for 3D digitization of cultural heritage / G. Pavlidis, A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, V. Tsioukas, C. Chamzas // Journal of Cultural Heritage. – 2007. – Vol. 8 – P. 93–98. – DOI: 10.1016/j.culher.2006.10.007.
- [6] **Vlachos, M.** Software comparison for underwater archaeological photogrammetric applications / M. Vlachos, L. Berger, R. Mathelier, P. Agrafiotis, D. Skarlatos // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2019. – Issue. XLII-2/W15. – P. 1195–1201. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-1195-2019.

Analog-to-digital photogrammetric conversion of holographic images recorded from several angles with an angular coverage of 4π steradian

E. V. Rabosh, V. A. Kokliushkin, N. S. Balbekin, N. V. Petrov

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

This work is devoted to the presentation of theoretical and experimental results in the field of analog-to-digital photogrammetric conversion of hologram images to build a digital three-dimensional model of an object. It is shown that the construction of an object model that contains sufficient information about the surface of the object is achieved by recording at least four holograms of an identical format, during which the object is oriented with its sides parallel to the faces of an imaginary tetrahedron enclosing it.

Keywords: Display holography, photogrammetry, analog-to-digital conversion, 3D-modeling.

Создание, развитие и внедрение научного направления «Защитная голография» в Республике Беларусь

Л. В. Танин

ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ», Минск, Беларусь

Создание национальных средств защиты документов, ценных бумаг и особо ценных объектов в Республике Беларусь является одной из важных государственных задач, обеспечивающих ее национальную и экономическую безопасность. По мере создания нормативной и производственной базы, подготовки кадров, приобретения опыта встал вопрос о создании производства специальных средств защиты ценных бумаг и документов и особо ценных объектов, таких, в частности, как кассовые аппараты. В докладе сообщается об этапах развития наукоемких средств защиты в Республике Беларусь с 1998 года по настоящее время – это голограмма, юниграмма, кодограмма, кристаллограмма, комбиграмма, а также о создании и использовании идентификатора и аппаратно-программного комплекса.

Ключевые слова: Средства защиты, Ценные бумаги, Документы, Особо ценные объекты, Юниграмма, Кристаллограмма, Идентификатор, Аппаратно-программный комплекс.

Цитирование: **Танин, Л. В.** Создание, развитие и внедрение научного направления «Защитная голография» в Республике Беларусь / Л. В. Танин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 478–482.

Большие потери от фальсификации целого ряда документов несла Республика Беларусь. В первую очередь, это происходило из-за отсутствия должной защиты от подделки, чем пользовались криминальные структуры «теневой» экономики.

По заданию правительства Республики Беларусь для борьбы с теневой экономикой на базе ООО «Магия света» в 1998 году создано наукоемкое высокотехнологичное белорусско-швейцарское предприятие «Голографическая индустрия» с привлечением нескольких миллионов долларов швейцарской компании Capital Business Management.

В этом случае появилась необходимость создания собственного инновационного продукта мирового уровня, что в свою очередь важно для определения вида и типа производства. Принимая во внимание данные предпосылки, стал вопрос о создании современного предприятия, отвечающего одному из самых высоких научно-технических уровней в мире.

С целью повышения эффективности создания национальной системы защиты документов, ценных бумаг и продукции в Республике Беларусь в 2002 году была проведена реорганизация белорусско-швейцарского предприятия «Голографическая индустрия» в белорусское предприятие с контрольным пакетом акций у государства, акционерами которого являются Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б.И.Степанова Национальной академии наук Беларуси, ОАО «ММЗ имени С.И.Вавилова - управляющая компания холдинга «БелОМО», ОАО «Кристалл» - управляющая компания холдинга «Минск кристалл групп», ОАО «Брестский ликероводочный завод «БелАлко», УП

«Технохимтрейд», ООО «Магия света», Танин Л.В., Танин В.А., позднее присоединился РУП «Криптотех» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь.

В сотрудничестве с РУП «Минская бумажная фабрика» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь были разработаны, прошли промышленное освоение и стали основным средством защиты важнейших государственных документов, в том числе акцизных марок, контрольных (идентификационных) знаков, товарных и товарно-транспортных сопроводительных документов, дипломов о высшем образовании, комплексные средства защиты. В качестве основы которых была взята рельефно-фазовая голограмма. Рельефно-фазовая голограмма, как основа комплексного средства защиты, имеет ряд преимуществ, в частности процесс разработки и изготовления таких голограмм является не только легко адаптированным с полиграфическими технологиями, но и наукоемким. В результате организовано наукоемкое высокотехнологичное предприятие «Голографическая индустрия» с крупнотиражным производством комбинированных аналоговых и цифровых голограмм. Предложены, созданы и запатентованы (в России, США, ФРГ, Болгарии, Чехословакии) «Способы формирования изображений», на основе которых получены комбинированные объемные и плоские изображения, взаимодополняющие друг друга», впервые в Беларуси заключено лицензионное соглашение по передаче (частично) патентных прав фирме Samsung Electronics Corporation (Южная Корея) на запатентованное в США крупное изобретение на «Способы формирования комбинированных изображений», оно зарегистрировано в Патентном ведомстве Республики Беларусь под №93-10001.

В 2004 году, используя идею патента «Способы формирования изображений», получена юниграмма, основанная на формировании комбинированного изображения – голографического изображения, совмещенного со скрытым латентным изображением, патент «Защитная метка изделия» № 1869 от 01.12.2004.

В рамках Государственных научно-технических программ «Шифр идентификации» и «Защита документов» разработаны и запатентованы инновационные, оригинальные, содержащие мировой приоритет средства национальной комплексной защиты (юниграмма и кодограмма), прошедшие этап от теоретических и экспериментальных исследований до промышленного освоения. Национальные средства защиты внедрены на предприятиях Департамента государственных знаков Республики Беларусь.

В настоящее время ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ» обладает технологиями полного цикла производства голограмм для защиты ценных бумаг, документов и продукции, которые имеют ряд преимуществ: визуальная опознаваемость голограмм; высокая информационная емкость; невозможность копирования контактными, гальваническими, фотографическими способами; низкая себестоимость; интегрируемость с распространенными технологиями; высокая наукоемкость, основанная на новейших достижениях фундаментальной и прикладной оптики.

Плодотворное сотрудничество с предприятиями Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь РУП «Минская печатная фабрика» Гознака и ГНТУП «Криптотех», опора на научные кадры и разработки Института физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси и Белорусского государственного университета, привлечение специалистов ООО «Магия света» и «АТВ-Лит» позволило разработать и освоить крупнотиражное производство комплексного средства защиты мирового уровня - юниграммы.

Собственные разработки специалистов ЗАО «Голографическая индустрия» в области фольги горячего тиснения, голографических защитных наклеек, блистерной упаковки позволили выйти на внешние рынки не только России и стран СНГ, но и стран ЕС с долей составляющей более 50% от производства продукции, выпускаемой предприятием на внутренний рынок.

К 2010 году завершился многолетний подготовительный этап работы коллектива ЗАО «Голографическая индустрия» по выходу на внешний рынок. Была разработана, прошла испытания и было принято решение закупать у нашего предприятия «Голографическая индустрия» голографическую фольгу горячего нанесения для нанесения на акцизные марки алкогольных и табачных изделий Азербайджана и Непала. Годовые поставки фольги горячего тиснения на предприятие «Гарсу Пасаулис» (Литва) составляют около 500 000 квадратных метров. Годовые внутренние поставки в Республике Беларусь основы для юниграммы и кодограммы составляют около одного миллиона квадратных метров, т.е. поставки на экспорт выросли до 50% внутренних поставок и возросли более чем в сто раз.

Впервые в мире созданы защитные средства, состоящие из рельефно-фазовой голограммы и полимерного слоя с поляризационным изображением - юниграмма и кристаллограмма.

Юниграмма – средство защиты, представляющее собой продукт совмещения защитной голограммы и полимерной многослойной пленки со скрытым поляризационным изображением, визуализируемым с помощью идентификатора, содержащего поляроидную пленку. Следует отметить, что это не механическое соединение двух защитных средств в одно, а их объединение предполагает определенные свойства того и другого объекта, которые позволяют по крайней мере сохранить защитные элементы двух средств с задачей их усиления за счет друг друга.

Кодограмма является дальнейшей инновационной разработкой юниграммы, обеспечивающей приборный контроль за счет введения голографического кода, при сохранении всех защитных свойств юниграммы. Голографический код позволяет шифровать информацию, например, по группе изделий, выпускаемых разными предприятиями, при внешне не различимых дизайнах голограммы. Кодограмма при своем изготовлении требует позиционирования по одной координате. Используется для защиты товарной и товарно-транспортной документации.

Кристаллограмма является следующим поколением многокомпонентных комбинированных защитных оптических элементов на базе рельефно-фазовой голограммы и полимерных слоев со скрытым поляризационным изображением. Уникальность данного защитного средства обусловлена тем, что в процессе визуализации закодированной информации при вращении идентификатора скрытых изображений происходит смена одних элементов на другие, а также меняется цветовая гамма элементов скрытого поляризационного изображения. Формирование скрытого поляризационного изображения происходит в слое жидкокристаллического материала, который наносится на защитную голограмму.

Комбиграмма – это средство защиты, которое объединяет рельефно-фазовую голограмму, кристаллограмму, и элемент защиты на основе поляризованной люминесценции. Элемент защиты на основе поляризованной люминесценции устроен следующим образом. В полимер добавляется люминофор, имеющий общий с полимером растворитель. Из этой смеси формируется тонкая пленка, в которой термомеханическим воздействием создаются анизотропные зоны в виде символов, наряду с изотропными областями. Способ идентификации данного элемента защиты состоит в том, что он облучается УФ-излучением и наблюдается через вращающийся поляризатор. Происходит мигание анизотропных областей на фоне более слабого постоянного свечения изотропных областей.

Повышены защитные свойства голограмм против повторной оригинации путем внедрения в голограмму голографических защитных элементов сложного типа - скрытых и кодированных изображений.

Повышены защитные свойства голограмм против копирования путем внедрения в нее оптически не копируемых изображений - поляризационных изображений и лазерной гравировки. Эффективность создания в голограмме скрытых изображений позволило существенно повысить защищенность голографического средства защиты, что подтверждается на практике при использовании юниграммы и кристаллограммы для защиты акцизных марок.

Изготовлено устройство для идентификации подлинности юниграммы, позволяющего визуализировать скрытые изображения: Это многофункциональный идентификатор, который серийно выпускается на ОАО «Минский механический завод имени С.И.Вавилова».

Идентификатор осуществляет контроль и визуализацию:

- скрытых голографических изображений, распределенных по поверхности и локализованных в конкретной области, записанных аналоговым и цифровыми методами;
- муаровых изображений, юниграмм, нерегулярных растровых структур, выполненных в виде набора несимметричных фигур и записанных в виде рельефной голограммы;
- основных средств полиграфической защиты (микротекст, ирисный раскат, красителей со стоковым и антистоксовым сдвигом).

Созданы новые технологии и средства голографической защиты – голографические ламинаты на паспорта и водительские удостоверения что решает проблему импортозамещения, разработаны, прошли промышленное освоение и внедрение новые голографические средства защиты, обладающие большим экспортным потенциалом – фольга горячего тиснения, блистерная упаковка сертифицированных бриллиантов, голографические наклейки. Среди потребителей голографической продукции: Азербайджан, Непал, Московская пробирная палата, Смоленский геммологический центр по сертификации бриллиантов, Красносельский ювелирпром, монетные дворы Санкт-Петербурга, Казахстана, Литвы.

Актуальной проблемой при выпуске голографических элементов защиты является также контроль качества продукции и идентификация подлинности защитных элементов в процессе производства. В результате была создана система оперативного контроля качества голографической продукции на различных этапах ее производства. Аппаратно-программный комплекс цифровой диагностики включает систему измерения углового распределения дифракционной эффективности рельефных отражательных голограмм, а также систему контроля голографических изображений в процессе тиснения голограмм. В качестве критериев оценки качества голографических изображений используется комплекс фотометрических параметров, таких как интегральная и локальная дифракционная эффективность, угловое распределение дифракционной эффективности.

Результаты исследований, представленные в данной работе, применены на практике при изготовлении защитных голограмм для акцизных марок, товарно-транспортных накладных, бланков строгой отчетности, для контроля доступа кассовых суммирующих аппаратов и специальных компьютерных систем (КСА и СКС).

Creation, development and implementation of scientific direction "Security holography" in the Republic of Belarus

Leonid V. Tanin

Holography Industry, Minsk, Belarus

The creation of national means of protecting documents, securities and especially valuable objects in the Republic of Belarus is one of the important state tasks that ensure its national and economic security. With the creation of a regulatory and production base, training of personnel, and gaining experience, the question arose of creating the production of special means of protecting securities and documents and especially valuable objects, such as cash registers in particular. The report reports on the stages of development of knowledge-intensive means of protection in the Republic of Belarus from 1998 to the present time - this is a hologram, unigram, codogram, crystallogram, combigram, as well as the creation and use of an identifier and a hardware and software complex.

Keywords: Means of protection, Securities, Documents, Especially valuable objects, Unigram, Crystallogram, Identifier, Hardware and software complex.

Наследие Ю. Н. Денисюка в современном мире

О. В. Андреева

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Представлена информация об истории принятия решения по заявке Ю. Н. Денисюка на открытие; описана ситуация, связанная с наивысшими достижениями в области технологий получения крупноформатных изобразительных голограмм, записанных по методу Ю. Н. Денисюка; рассказано об архивных документах пятидесятилетней давности, в которых Ю. Н. называл перспективные направления развития оптической науки, что интересно сравнить с современной ситуацией.

Ключевые слова: Оптика, Голография, Схема Денисюка, Изобразительная голография.

Цитирование: Андреева, О. В. Наследие Ю. Н. Денисюка в современном мире / О. В. Андреева // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 483–486.

История оптики XX-го столетия не так богата открытиями, как два предыдущих столетия. Особенно это относится ко второй половине XX-го века. Ярким событием второй половины XX-го века еще в долазерную эпоху, явилось открытие Ю. Н., описанное им в дневниковых записях 1959 г. и опубликованное в 1962 г. [1]. Открытие было сформулировано в заявке №88 от 1 февраля 1962 года: «Установлено ранее неизвестное явление возникновения пространственного неискаженного цветного изображения объекта при отражении излучения от трехмерного элемента прозрачной материальной среды, в которой распределение плотности вещества соответствует распределению интенсивности поля стоячих волн, образующихся вокруг объекта при рассеянии на нем излучения».

Ученый Совет Государственного оптического института им. С. И. Вавилова (ГОИ), в котором Ю. Н. работал с 1954 г., в 1962-м году вынес отрицательное решение по заявке, поданной Ю. Н. на открытие голографии в трехмерных средах и тем самым, по мнению автора заявки "лишил Советский Союз международного приоритета в том, что назвали "вторым открытием голографии" [2].

Следует отметить, что данная заявка была всё-таки зарегистрирована в СССР, но спустя почти 10 лет с момента её подачи, хотя и с приоритетом от 1962 г., но это уже не имело решающего значения в установлении приоритетов.

Несмотря на отрицательное решение по заявке на открытие, молодого ученого поддерживали многие выдающиеся ученые и специалисты, а сам Ю. Н. продолжал свою научную деятельность.

Работы по голографии были возобновлены под влиянием зарубежных исследований, и в 1967 г. в ГОИ была организована лаборатория голографии, естественно, под руководством Ю. Н. Основной целью лаборатории являлась реализация практических приложений голографии, которые стали возможны благодаря появлению и развитию лазеров.

В 1975 в ГОИ под руководством Ю. Н. был организован отдел голографии с выделением в отдельную структуру лаборатории изобразительной голографии, оснащенной помещениями и оборудованием. Изобразительная голография во второй половине XX-го века превратилась в самостоятельную научно-техническую область, которая до настоящего времени пользуется популярностью и вниманием широкой общественности. Об этом свидетельствует огромный интерес к выставкам изобразительных голограмм, которые организуются в разных странах и разных концах Земного шара.

В Музее Оптики Университета ИТМО демонстрируются голограммы, полученные в отделе голографии ГОИ в 80-х годах прошлого века, которые до организации Музея Оптики находились в Музее голографии ГОИ. Экспонируемые голограммы представляют наивысшие технологические достижения в этой области. Вниманию широкой публики доступны голографические изображения разнообразных объектов, включая произведения искусства, художественные композиции, портреты и многое другое.

Любуясь такими изображениями ни один придирчивый зритель не найдет видимых дефектов даже на самых больших по размеру голограммах.

Разработанная и реализованная в ГОИ в отделе голографии технология получения изобразительных голограмм по методу Ю. Н. Денисюка представляет собой неразрывный сплав науки и техники, бурное развитие которого пришлось на середину 80-х годов XX-го века. Это развитие опиралось на многолетнюю историю научных поисков, подходов и технологических решений как в области оптики и фотографической науки, так и в области политической жизни нашего государства. Статус "Памятник науки и техники" решением Экспертного совета Политехнического музея (г. Москва) от 16 декабря 2022 года присвоен двум крупноформатным голограммам "Бюст А. С. Пушкина" и "Братина", Отражательная монохромная голограмма «Бюст А. С. Пушкина» , записанная по методу Ю. Н. в 1977 г. в единственном экземпляре по технологии и на материалах, созданных в ГОИ, является непревзойдённым образцом практически предельного размера голограмм такого типа.

К сожалению, технология изготовления крупноформатных голограмм такого типа в настоящее время утрачена. Нашим современникам остается лишь восхищаться теми экземплярами, которые выставляет на обозрение Музей оптики. К счастью, фонды Музея оптики обладают запасом изобразительных голограмм высокого качества, полученных по методу Ю. Н. Денисюка. Однако, вызывает опасение тот факт, что в настоящее время нет технологии обеспечения сохранности голограмм такого типа, что в будущем, пусть и отдаленном, приведет к утрате этого наследия.

Ю. Н. был не только автором и генератором замечательных идей, но и выдающимся общественным деятелем: одним из главных организаторов и Председателем Совета по голографии при АН СССР, бессменным Председателем программного комитета Всесоюзных конференций по голографии, главным редактором тематических сборников.

Большое количество архивных материалов Ю. Н., собранных Д. И. Стаселько, было передано в 2016 г. в Политехнический музей (г. Москва). В их числе оказались машинописные

копии чрезвычайно интересных документов, датированных 1973 г. Они свидетельствуют об озабоченности Ю.Н. состоянием науки в СССР и роли Государственного Оптического Института как ведущей научной организации в области оптики.

Его обращения к Президенту АН СССР и министру СССР, курирующему ГОИ, содержат не только ряд конкретных организационных предложений, но и намечают перспективные пути развития оптической науки в целом и голографии в частности.

В обращении к Президенту Академии наук Ю.Н. пишет:

"...я серьезно обеспокоен тем, что в Советском Союзе в настоящее время фактически отсутствует научный центр, ведущий исследования в направлении, которое можно назвать "проблемой оптического изображения". Эта проблема, касающаяся взаимоотношения человека с предметами окружающего мира, на мой взгляд, является непреходящей основой оптики и по своей научной и практической значимости сравнима только с проблемой строения материи.»

В этом же письме Ю. Н. обсуждает научные перспективы голографии – он считает, что "...голография является одним из основных перспективных направлений развития оптической науки".

Особо отмечает, что "...интересными и долговременными являются проблемы, связанные с глубоким анализом явления оптического отображения объектов. В результате ...будет, по видимому, создан своеобразный "оптический искусственный интеллект" мыслящий образами. В соединении с методами иконоки такой "интеллект" может быть использован для создания систем, способных распознавать предметы окружающего мира и их логическую взаимосвязь."

"Автор настоящего заявления выступает с предложением создать на основе части ГОИ научно-исследовательский институт нового типа со специальным статусом двойного управления Академией Наук и Оптической промышленностью."

"В целом такой институт было бы целесообразно ориентировать на исследования по проблеме "изображение" и включить в его тематику следующие разделы:

1. Голография применительно к :

- Осуществлению логических операций, созданию оптической памяти и другим аналогичным задачам (оптическая память в трехмерных средах, ассоциативная память в трехмерных средах, миниатюрные трехмерные элементы со сложным откликом, распознавание образов методом голографии в двумерных и трехмерных средах).

- Разработке голографических методов приема и преобразования оптической информации. (Наблюдение сквозь неоднородную атмосферу и другие неоднородные оптические среды, супергетеродинный прием голограмм, преобразование информации к виду, удобному для передачи по каналам связи, преобразование информации, необходимое для решения задач голографического кино и телевидения и др.)

Институт должен быть многопрофильным и включать также такие разделы как:

2. Иконика применительно к созданию оптических фотоэлектрических систем способных опознавать образы предметов, освещенных некогерентным излучением

3. Оптические квантовые генераторы с высокой степенью когерентности, предназначенные для использования в голографии.

4. Нелинейная оптика и физика твердого тела применительно к решению задач упомянутых в пунктах 1 и 3.

5. Области оптотехники, связанные с созданием оптической аппаратуры для научных исследований."

Оглядываясь на 50-летний период, прошедший со времени написания этих предложений, можно сказать, что историческое развитие науки подтвердило прогнозы великого ученого.

В заключение хотелось бы отметить, что открытое Ю. Н. "явление отображения оптических свойств объекта трехмерной моделью окружающей этот объект картины стоячих" было им математически обосновано для оптического диапазона электромагнитного излучения. Нет сомнений, что "голографический принцип", лежащий в основе современных методов исследования черных дыр нашей Вселенной, терминологически связан именно с тем явлением, которое сформулировал Ю.Н. для оптического диапазона и которое лежит в основе трехмерной голографии.

Список источников

- [1] **Денисюк, Ю. Н.** Об отражении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения// Доклады АН СССР—1962. — Т. 144. — № 6. — С. 1275–1278.
- [2] **Денисюк, Ю. Н.** Голография с записью в трёхмерных и двумерных средах// Труды ГОИ—1969.— Т. 36.—вып.165. —С. 131.

The legacy of Yu. N. Denisyuk in the modern world

O. V. Andreeva

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Information about the history of decision-making on Yu.N. Denisyuk's discovery application is presented; describes the situation associated with the highest achievements in the field of technologies for obtaining large-format image holograms recorded using the method of Yu.N. Denisyuk; it is told about archival documents of fifty years ago, in which Yu.N. named promising directions in the development of optical science, which is interesting to compare with the current situation.

Keywords: Optics, Holography, Denisyuk scheme, Image holography.

Отечественная дифракционная оптика в зеркале конференций HOLOEXPO 2018–2022

Г. И. Грейсух, А. И. Антонов, Е. Г. Ежов, О. А. Захаров

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

Показано, что дифракционная оптика была широко представлена в каждой из пяти прошедших конференций специальной секцией, а наиболее значимые доклады, представлявшие интерес для широкого круга участников, выносились на пленарные заседания. При этом тематики докладов охватывали практически все наиболее перспективные, направления развития дифракционной оптики. Были представлены принципиальные подходы к решению актуальных научно-технических проблем с помощью голограммных и дифракционных (включая мета-) элементов, а особое внимание уделялось технологическим вопросам.

Ключевые слова: Международная конференция HOLOEXPO, Дифракционная оптика, Голограммные и дифракционные оптические элементы.

Цитирование: Грейсух, Г. И. Отечественная дифракционная оптика в зеркале конференций HOLOEXPO 2018–2022 / Г. И. Грейсух, А. И. Антонов, Е. Г. Ежов, О. А. Захаров // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 487–492.

Введение

Напомним, что на предыдущей юбилейной конференции HOLOEXPO 2018 был представлен доклад «Отечественная дифракционная оптика в зеркале конференций HOLOEXPO 2004–2017» [1]. Авторы настоящего доклада сочли целесообразным продолжить юбилейное обобщение результатов по этой тематике, которая на ряду с другими важнейшими тематиками и обуславливает название нашей конференции «...по голографии и прикладным оптическим технологиям».

Обзор программ ГОЛОЭКСПО 2018-2022

Анализируя и сопоставляя программы пяти прошедших конференций легко видеть, что дифракционная оптика была широко представлена в каждой из них специальной секцией, а наиболее значимые доклады, представлявшие интерес для широкого круга участников, выносились на пленарные заседания.

ГОЛОЭКСПО 2018

1. С. Б. Одинокоев и др. Перспективы применения голограммных и дифракционных элементов в оптических системах приборов визуального наблюдения, прицеливания и дополненной реальности;

2. А. В. Лукин и др. Современные и перспективные возможности получения и применения плёночных крупноформатных синтезированных голограммных компенсаторов (нуль-корректоров) в телескопостроении;

3. В. П. Корольков и др. Современные методы повышения разрешения термохимической лазерной записи дифракционных структур;
4. А. Л. Толстик и др. Импульсная запись коротко- и долгоживущих голографических решеток в кристаллах семейства силленитов;
5. В. П. Бессмельцев и др. Многоканальный конфокальный микроскоп на основе дифракционного мультипликатора;
6. В. А. Бланк и др. Гармоническая линза с дифракционной решеткой для формирования гиперспектральных изображений;
7. Г. И. Грейсух и др. Гармонические киноформные микроструктуры в дифракционной оптике и голографии;
8. В. П. Корольков и др. Лазерные методы формирования металлооксидных решеток и их характеристика;
9. А. Н. Мельников и др. Возможности изготовления эффективной цилиндрической голограммной оптики при помощи делительных машин маятникового типа;
10. Э. Муслимов и др. Моделирование астрономического спектрографа с голограммной дифракционной решеткой на поверхности свободной формы;
11. Д. Ю. Молодцов и др. Применение микрозеркальных модуляторов для вывода голографических и дифракционных оптических элементов в задачах оптического кодирования и распознавания;
12. В. В. Краснов и др. Уменьшение ошибки синтеза фазовых дифракционных оптических элементов методом прямого поиска со случайной траекторией с локализацией шума.

ГОЛОЭКСПО 2019

1. Г. И. Грейсух и др. Метаповерхности в оптике и голографии: физические принципы и достигнутые результаты;
2. С. Н. Корешев Принципы построения и ключевые технологии устройств дополненной реальности световодного типа с голограммными и дифракционными оптическими элементами;
3. А. В. Лукин и др. Светосильные дифракционные оптические элементы: особенности технологий изготовления, аттестация, перспективные области применения;
4. В. С. Васильев и др. Изображающие системы на основе неизображающих обобщенных линз;
5. А. В. Лукин и др. Лазерно-голографический контроль параметров объективов, их компонентов и элементов в инфракрасном и видимом диапазонах спектра на основе использования гиперспектрального регистрирующего модуля;
6. Г. И. Грейсух и др. Дифракционные элементы в оптических системах ИК-диапазона;
7. Р. К. Насыров и др. Влияние ошибок изготовления ДОЭ на распределение интенсивности света в задачах мультипликации и гомогенизации пучков;

8. А. В. Лукин Волновой фронт: возможности его восстановления и формообразования в голографии и дифракционной оптике.

ГОЛОЭКСПО 2020

1. Г. И. Грейсух и др. Дифракционные микроструктуры: перспективы развития и ограничения;

2. А. В. Лукин и др. Объединенные метрологические возможности осевых синтезированных голограмм и эталонных пробных стекол для поверки и калибровки средств измерений;

3. В. М. Петров и др. Голографические отражательные решетки Брэгга и их роль в работе мощных импульсных лазеров с обращением волнового фронта;

4. А. Н. Путилин и др. Волноводные голографические оптические элементы для дисплеев дополненной реальности;

5. Р. В. Скиданов и др. Экспериментальное исследование изображающего объектива на основе кольцевой гармонической линзы;

6. В. П. Корольков и др. Новые возможности в области создания микро-наноструктурированных оптических и голографических компонентов и лазерных технологий микрообработки;

7. С. В. Ганчевская и др. Экспериментальное исследование изображающего объектива на основе асферических гармонических линз;

8. Н. К. Павлычева и др. Концепция композитных голограммных оптических элементов;

9. В. В. Краснов и др. Амплитудные ДОЭ без несущей пространственной частоты для работы в расходящихся пучках;

10. М. В. Шишова и др. Мультиплексные брэгговские дифракционные решетки для световодов системы дополненной реальности;

11. В. М. Петров и др. Отражательные голографические решетки Брэгга в оптическом волокне для датчиков вибраций и малых перемещений.

ГОЛОЭКСПО 2021

1. А. В. Лукин и др. Новые возможности лазерно-голографического контроля крупноформатных зеркал ЕЛТ-телескопов на основе использования конических синтезированных голограмм;

2. Г. И. Грейсух и др. Высокоэффективные технологичные дифракционные микроструктуры видимого диапазона;

3. Е. Ю. Злоказов Когерентные дифракционные оптические системы с синтезированным комплексным импульсным откликом;

4. В. Ю. Венедиктов и др. Многоканальный голографический датчик волнового фронта;

5. В. В. Подлипнов и др. Формирование мод Эрмита — Гаусса и их распознавание в условиях турбулентной оптической среды;

6. Р. В. Скиданов и др. Системы обобщенных гармонических линз для формирования изображений;

7. И. А. Гуськов и др. Оптимизация и экспериментальное исследование коэффициента пропускания голограммного дисплея волноводного типа;

8. В. М. Петров и др. LiSrAlF₆:Cr лазер с решеткой Брэгга: перестройка и генерация двух длин волн;

9. В. И. Курт и др. Методика измерений радиусов кривизны и формы сферических поверхностей линз и зеркал, в том числе пробных стекол, на основе использования аттестованных отражательных амплитудных синтезированных голограмм в качестве оптических образцов;

10. С. В. Ганчевская и др. ДОЭ для формирования вихревого пучка с ультравысоким топологическим зарядом;

11. Н. А. Ивлев и др. Оптическая запись дифракционных микроструктур на поверхности халькогенидного стеклообразного полупроводника для формирования вихревых лазерных пучков;

12. Н. К. Павлычева Дифракционные решетки для спектральных приборов;

13. Г. И. Грейсух и др. Гармоническая дифракционная линза для RGB-светодиодного излучения;

14. В. П. Корольков и др. О методе измерения распределения энергии света по фокусам для матрицы дифракционного компонента бифокальной интраокулярной линзы.

ГОЛОЭКСПО 2022

1. Г. И. Грейсух и др. Сопоставительный анализ хроматизма склеенного нанокompозитного компонента и дифракционной линзы;

2. Р. С. Стариков Интеллектуальный голографический синтез и нейроподобные оптико-цифровые дифракционные системы;

3. А. А. Кутанов и др. Прямая запись субволновых микроструктур на пленках аморфного кремния излучением полупроводникового лазера с $\lambda=405$ nm;

4. Н. А. Ивлиев и др. Прямая запись микроструктур в пленках карбазолсодержащего азополимера структурированными лазерными пучками;

5. В.П. Корольков и др. Анализ допусков при формировании двумерных скрещенных решеток методом лазерной литографии и программная коррекция режимов записи;

6. С. С. Стафеев и др. Металинзы для острой фокусировки света и формирования обратных потоков энергии;

7. Д. А. Быков и др. Резонансы в дифракционных решётках с изменяющимся периодом;

8. С. М. Шандаров и др. Динамические отражательные решетки в кристаллах силленитов;

9. Г. И. Грейсух и др. Дифракционная эффективность пилообразных двухрельефных микроструктур в рамках электромагнитной теории дифракции;

10. Д. А. Белоусов и др. Анализ встраиваемых 2D дифракционных сенсорных элементов для контроля долговременной нестабильности систем лазерной записи ДОЭ;
11. С. Н. Корешев и др. Аберрации голограмм, обусловленные нарушением закона Брэгга и вариациями глубины и формы профиля их поверхностной решетки;
12. Л. Л. Досколович Гибридный метод расчета дифракционных оптических элементов, формирующих заданные распределения освещенности;
13. Д. М. Ахметов и др. Сравнительный анализ алгоритмов расчета оптических систем с использованием композитных голограммных оптических элементов;
14. Н. М. Ганжерли и др. Рельефно-фазовые высокочастотные голографические решетки на содержащих желатин светочувствительных средах;
15. Е. Н. Рагозин и др. Создание плоских и вогнутых VLS-решеток для вакуумной области спектра методом интерференционной литографии и их применение;
16. Е. С. Мусихина и др. Осевое мультиплексирование объемных брэгговских решеток с общим углом Брэгга в фото-термо-рефрактивном стекле;
17. П. П. Соколов и др. Особенности формирования и свойства объемных и рельефных решеток в фотополимерных материалах;
18. А. Н. Мельников и др. Возможности лазерно-голографического контроля процессов восстановления расчетной формы и заданного позиционирования компонентов крупноформатной оптической системы в условиях космического базирования на примере телескопа «Миллиметр»;
19. Р. А. Окунь и др. Применение фотополимера Bayfol NX для сжатия импульсов в ИК диапазоне;
20. А. Н. Мельников и др. Делительные машины маятникового типа — новые перспективные средства прецизионного формирования с наноразмерной точностью периодических штриховых структур на поверхностях с большой стрелкой прогиба;
21. Ю. Л. Корзинин и др. Отражательные брэгговские решетки на ФТР стекле: влияние геометрии элемента на его брэгговские параметры.

Выводы

Представленный обзор программ, прошедших пяти конференций позволяет сделать следующие выводы.

Спектр пленарных и секционных докладов охватывал практически все наиболее перспективные, направления развития дифракционной оптики. Были представлены принципиальные подходы к решению актуальных научно-технических проблем с помощью голограммных и дифракционных (включая мета-) элементов, и при этом особое внимание уделялось технологическим вопросам.

Количественное соотношение докладов, сгруппированных по отдельным тематикам, наглядно демонстрирует вышеизложенное:

1. Изображающая голограммная и дифракционная оптика (включая высоко порядковые гармонические элементы) 18 докладов.

2. Элементная база оптических трактов устройств дополненной реальности 5 докладов + семинар «Актуальные вопросы и перспективы развития систем дополненной реальности».
3. Корректоры, компенсаторы, формирователи волнового фронта и специализированных пучков 10 докладов.
4. Технологии синтеза и контроля параметров дифракционных структур - 21 доклад.
5. Голографическая запись дифракционных структур - 7 докладов.
6. Использование голограммных и дифракционных оптических элементов в приборах различного назначения, включая спектральные приборы - 9 докладов.
7. Метаповерхности и резонансные дифракционные решетки - 3 доклада.

Неравномерность распределения количества докладов по тематикам обусловлена комплексом объективных и субъективных факторов, включающих и значимость тематики на сегодня и на перспективу, и научные интересы членов голографического сообщества, и, конечно, современные технологические возможности.

Но самый главный вывод заключается в том, что каждая наша конференция, включая её устные и стендовые доклады, вопросы и ответы на них, а также дискуссии в кулуарах, стимулировали дальнейшие исследования, порождали новые доклады и даже новые тематики, и научные направления.

Список источников

- [1] Архив тезисов докладов и программ конференций HOLOEXPO Science & Practice за 2004–2022 гг. [Электронный ресурс]. URL: <https://holoexpo.ru/proceedings/?ysclid=lfte7n7e7h618963506>

Native diffractive optics in the mirror of the HOLOEXPO 2018-2022

G. I. Greisukh, A. I. Antonov, E. G. Ezhov, O. A. Zakharov

Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Penza, Russia

It is shown that diffractive optics was widely represented in each of the five past conferences by a special section, and the most significant reports of interest to a wide range of participants were submitted to the plenary sessions. At the same time, the topics of the reports covered almost all the most promising areas of development of diffraction optics. Principal approaches to solving current scientific and technical problems using hologram and diffraction (including meta-) elements were presented, and special attention was paid to technological issues.

Keywords: HOLOEXPO international conference, Diffractive optics, Hologram and diffractive optical elements.

Голографическая продукция Славич

Ю. А. Березкина

ООО «Славич Нойа Технологии», Переславль-Залесский, Россия

ООО «Торговый дом «Славич»», Переславль-Залесский, Россия

В данном докладе представлена история российского предприятия «Славич» начиная со строительства фабрики, строительством новых корпусов с размещением крупных производств магнитных лент, фотобумаги и фотопластин, заканчивая работой в сегодняшние дни. Изложено детальное описание подразделения «МИКРОН», производство которого не имеет аналогов в отечественной фотохимии и является специфическим наукоемким предприятием. Подразделение специализируется на выпуске фотопластинок и фотоленок для науки, спектрального анализа черных и цветных металлов, космических исследований, астрономии, масок цветных телевизоров, а также фотопластин для изобразительной голографии. На сегодняшний момент на производстве Микрон производит следующие виды фотопластин и фотоленок для голографии: ВРП-М, ПФГ-01, ПФГ-03М, ПФГ-03Ц и ПФГ-04. Представлено описание каждого вида фотопластин и пленок. Описаны основные технологические стадии изготовления фотопластин для голографии. Представлено оборудование для изготовления фотопластин. Описан режим вакуумной гигиены производства. Для расширения круга пользователей голографических продуктов представлена мини-лаборатория для изготовления голограмм, в которой реализована самая популярная и простая голографическая схема, разработанная Ю.Н. Денисюком.

Ключевые слова: Голографические материалы, Фотопластинки, Фотопленка, Производство, Поливные машины, Основные стадии, Сотрудничество.

Цитирование: **Березкина, Ю. А.** Голографическая продукция Славич / Ю. А. Березкина // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 493–496.

В 140 км от Москвы расположился небольшой современный город Переславль-Залесский, основанный Юрием Долгоруким в 1152 году, стоящий на берегах древнего озера Плещеево. В этом небольшом и красивом городке, являющимся жемчужиной Золотого Кольца России, находится легендарное российское предприятие с многолетней историей «Славич».

История предприятия Славич ведет свое начало с 1 июля 1931 года, когда в городе Переславле-Залесском вступила в строй первая в СССР фабрика кинопленки. С 1970 года велась интенсивная реконструкция фабрики, строительство новых корпусов с размещением крупных производств магнитных лент, фотобумаги и фотопластин

7 июня 1975 года Государственная комиссия приняла в эксплуатацию цех фотопластинок на твердой основе. На сегодняшний день это подразделение «МИКРОН». производство не имеет аналогов в отечественной фотохимии и является специфическим наукоемким предприятием. Цех оснащался оборудованием, поставленным по контракту с японской фирмой «Вако-Коеки». Шефмонтаж осуществлялся японскими специалистами при активном участии работников производства.

Первая фотопластинка ВР-П для микроэлектроники была выпущена в 1975 году. В последующие годы было освоено производство еще 20 видов фотопластин для науки, спектрального анализа черных и цветных металлов, космических исследований, астрономии, масок цветных телевизоров. Фотохарактеристики пластин соответствуют зарубежным аналогам фирм «Агфа», «Кодак» и др. А некоторые виды не имеют мировых аналогов, являются уникальными.

С 1978 г. освоено производство пластин для изобразительной голографии. На сегодняшний момент Микрон производит следующие виды фотопластин и фотоленок для голографии: ВРП-М, ПФГ-01, ПФГ-03М, ПФГ-03Ц и ПФГ-04.

Назначение:

- ВРП-М пластинки и пленки фотографические высокоразрешающие для голографии предназначены для получения голограмм по конаправленной и контрнаправленной схеме непрерывным или импульсным лазером с длиной волны генерации 530 нм для целей неразрушающего контроля изделий, оптической обработки информации, портретной съемки и съемки движущихся объектов.
- ПФГ-01 Пластинки и пленки фотографические высокоразрешающие для голографии предназначены для получения голограмм по конаправленной и контрнаправленной схеме непрерывным лазером с длиной волны генерации 633 нм для целей неразрушающего контроля изделий, оптической обработки информации, портретной съемки и съемки движущихся объектов.
- ПФГ-03М Пластинки и пленки фотографические высокоразрешающие для голографии предназначены для регистрации контрнаправленных отражательных голограмм.
- ПФГ-03Ц Пластинки и пленки фотографические высокоразрешающие для голографии предназначены для изготовления цветных отражательных голограмм.
- ПФГ-04 Пластинки фотографические высокоразрешающие для голографии на основе бихромированного желатина предназначены для записи трехмерных контр и конаправленных голограмм.

Основные размеры фотопластинок в мм

Вскрывать и обрабатывать фотопластинки необходимо при косвенном неактивном освещении с использованием:

- темно-красного светофильтра №107 для фотопластинок ВРП, ПФГ-04
- темно-зеленого светофильтра №170 для фотопластинок ПФГ-01, ПФГ-03М
- светофильтров №107 и №170 для фотопластинок ПФГ-03Ц.

Гарантийный срок хранения фотопластинок: ВРП 24 месяца, ПФГ-01 12 месяцев, ПФГ-03М от 6 до 9 месяцев в зависимости от формата и упаковки, ПФГ-03Ц 9 месяцев, ПФГ-04 8 месяцев.

Фотопленка изготавливается в рулонах и листах. Размеры фотопленки согласуются с потребителем. Толщина основы может быть 175 ± 5 , 190 ± 5 мкм.

Вскрывать и обрабатывать фотопленки необходимо при косвенном неактивном освещении с использованием:

- темно-красного светофильтра №107 для фотопленок ВРП, ВРП-М, ПФГ-04
- темно-зеленого светофильтра №170 для фотопленок ПФГ-01, ПФГ-03М
- светофильтров №107 и №170 для фотопленки ПФГ-03Ц.

Гарантийный срок хранения фотопленок: в рулонах 18 месяцев, в листах:

- ВРП, ВРП-М, ПФГ-01, ПФГ-04 - 12 месяцев.
- ПФГ-03М, ПФГ-03Ц - 6 месяцев.

Производство фотопластинок состоит из одного технологического потока и включает в себя следующие основные стадии:

Подготовка стекла

При изготовлении голографических пластин используется стекло российских производителей. На предприятие стекло поступает в ящиках большого формата. Для дальнейшей работы стекло режут на форматы: 330*406, 406*609 и 609*812.

Каждое стекло подвергается визитажу. Для этого используются специальные телевизионные приемники, которые определяют плоскостность стекла.

Далее осуществляется очистка стекла (смешивание обессоленной воды и поверхностно-активного вещества), химическая обработка стекла (предварительное удаление остатков моющего средства обессоленной водой), механическая обработка стекла (очистка стекла валиками из полихлорвиниловой губки при подаче обессоленной воды), окончательная водная промывка стекла. Стекло готово к поливу.

Синтез эмульсии

В цехе выпускают 9 видов эмульсии, 3 вида используются при изготовлении голографических материалов. В отделении синтеза имеется 3 линии синтеза эмульсий (промывная, осаждение, сепарирование). Для синтеза голографических эмульсий задействована промывная линия.

Полив эмульсии на стекло (пленку)

После того, как подготовили стекло и эмульсию, осуществляется полив эмульсии на стекло, либо на гибкую подложку. В цехе имеется 3 поливные машины:

1. Поливная машина для стекол формата 330*406 и 406*609
2. Поливная машина для стекол формата 609*812
3. Пленочная поливная машина шириной розлива 350 мм.

Термостарение пластин

После полива стекла помещаются в камеры термостарения, где полуфабрикат при определенной температуре и влажности доходит до соответствующих технологических характеристик.

Завершающая стадия технологического процесса - резка полных стекол (пленки) на различные форматы и упаковка.

В подразделении разработаны и соблюдаются правила вакуумной гигиены. Полив и резка фотопластин происходит в условиях высокой чистоты. Что бы попасть в отделения полива и резки фотопластин, необходимо пройти через камеру обдува. На каждой стадии технологического процесса изготовления пластин и пленок ведется контроль качества продукции.

Для расширения круга пользователей голографических продуктов в 2022 году на производстве выпущена первая мини-лаборатория по изготовлению голограмм. В нашем наборе реализована самая популярная и простая голографическая схема, разработанная Ю. Н. Денисюком. С помощью данного набора нельзя записать большие голограммы и голограммы подвижных объектов (людей, животных), но освоить основные операции записи голограммы, получить хоть и маленькие, но интересные по содержанию голограммы и реально прикоснуться к одному из самых замечательных достижений 20-го века – изобразительной голографии – это возможно! Этот голографический комплект идеально подходит как для школьных проектов, так и для домашнего использования. Это простая в использовании мини-лаборатория, которая позволяет совершенно самостоятельно записать объект в 3D голограмму. В наборе имеется все необходимое, чтобы провести эксперимент.

Наша компания постоянно расширяет географию поставок голографической продукции. Мы заинтересованы в работе с новыми клиентами и приглашаем к сотрудничеству всех, кто заинтересован в данном виде продукции.

Holographic materials Slavich

I. Berezkina

«Slavich Noya Technology» limited liability company, Pereslavl-Zalessky, Russia

The Russian enterprise "Slavich" was founded on July 1, 1931. On June 7, 1975, a photographic plate workshop was put into operation. The first photographic plate was released in 1975 by the Micron division. Since 1978, the production of plates for pictorial holography has been mastered. Mikron produces the following types of photographic plates and films for holography: VRP-M, PFG-01, PFG-03M, PFG-03Ts and PFG-04. In 2022, a mini-laboratory for the production of holograms for school projects and for home use is being prepared for release. This report will discuss where and how the process of manufacturing holographic photographic plates takes place (the main stages of production, vacuum hygiene rules, product quality control).

Keywords: Holographic materials, Production, Cooperation.

Научное издание

HOLOEXPO 2023

20-я Международная конференция по голографии
и прикладным оптическим технологиям

Тезисы докладов

Редактор: М. В. Шишова

Дизайн обложки: С. С. Орлов

TECHNOLOGY



holoexpo.ru

