

30. Концепция композитных голограммных оптических элементов

Э. Р. Муслимов¹, Н. К. Павлычева¹, И. А. Гуськов^{1,2}

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

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

В настоящей работе предлагается концепция голограммного оптического элемента нового типа. Такой оптический элемент будет представлять собой голограмму, записываемую путем стыковки нескольких элементарных полей. При этом в каждом элементарном поле изменяются следующие параметры: глубина профиля штриха или амплитуда модуляции показателя преломления; форма профиля штриха или полосы; частота штрихов/полос; кривизна штрихов/полос и параметры неравномерности их периода. У полученного композитного элемента такие характеристики как дифракционная эффективность, спектральная и угловая селективность, поляризационные, дисперсионные и абберационные свойства могут контролироваться локально. Использование подобных элементов позволит создавать новые оптико-электронные приборы с улучшенными характеристиками. Некоторые преимущества подобного элемента показаны на примере схемы спектрографа для видимого диапазона 400–800 нм.

Ключевые слова: Изображающие оптические системы, Физические голограммы, Технология записи, Интерферометрия со сшиванием полей, Высокая апертура, Широкое поле зрения.

Цитирование: Муслимов, Э. Р. Концепция композитных голограммных оптических элементов / Э. Р. Муслимов, Н. К. Павлычева, И. А. Гуськов // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 181–189.

Введение

В любой изображающей оптической системе наблюдается изменение основных оптических характеристик в пространстве — как по полю зрения, так и по апертуре. Это свойство справедливо для различных по физической природе характеристик: увеличения, геометрических aberrаций, потерь на отражение на поверхностях, потерь излучения из-за поглощения и рассеяния в материале оптических деталей, дифракционной эффективности. Изменение указанных характеристик ограничивает создание оптических систем с высокой светосилой, широким полем зрения, в некоторых случаях сужает рабочий спектральный диапазон системы и, в целом, препятствует повышению ключевых функциональных показателей оптических систем, например, разрешающей способности и чувствительности. С другой стороны, одновременное повышение перечисленных характеристик по апертуре и полю зрения неизбежно требует увеличения свободных коррекционных параметров и возможности их локального изменения для разных точек апертуры/поля зрения. Количество свободных коррекционных параметров ограничено рядом факторов:

– Поскольку снижение оптических характеристик обусловлено различными физическими эффектами, одновременная коррекция нескольких характеристик требует использования различных физических принципов.

– Технологии изготовления оптических деталей имеют ограничения, в частности, условия осевой или плоскостной симметрии оптических поверхностей, пределы точности контроля оптических поверхностей и деталей, пределы точности сборки и юстировки.

– Даже в случае, если коррекция некоторой оптической характеристики возможна физически и технологически, поиск оптимального технического решения ограничен возможностями существующих алгоритмов расчета и оптимизации и их программной реализации. С ростом числа свободных параметров влияние данного фактора резко возрастает.

Необходимость повышения оптических характеристик изображающих систем по полю зрения и апертуре вступает в противоречие с перечисленными ограничивающими факторами. В рамках настоящего исследования рассматриваются перспективы преодоления указанных противоречий за счет развития нового типа голограммных элементов.

1. Базовые технологии

Решить сформулированную выше проблему для достаточно обширной группы оптических и оптико-электронных приборов можно, опираясь на интегральное применение нескольких известных и развивающихся технологий:

1. Голограммные оптические элементы. Оптическая голография по определению является интерферометрическим методом регистрации когерентной электромагнитной волны, дифрагированной на объекте [1]. В контексте настоящего исследования это также мощный метод создания оптических компонентов с заданными свойствами. Голограммный оптический элемент (ГОЭ) может формировать изображение или волновой фронт заданной произвольной формы, выполнять функции рассеивателя или поляризатора. Среди существующих типов ГОЭ важно выделить следующие группы:

1а. Физические голограммы. ГОЭ может быть представлен и фактически изготовлен путем регистрации на фоточувствительном слое интерференционной картины от двух волновых фронтов. Как правило, при таком подходе схема записи голограммы сравнительно проста, а параметры записи и воспроизведения связаны непосредственно.

Примером могут служить изобразительные голограммы или голограммные дифракционные решетки, используемые в спектральных приборах [2].

1б. Синтезированные голограммы, получаемые методом прямой записи лазерным пучком. С другой стороны, ГОЭ, рассчитанный как интерференционная картина, на стадии производства может рассматриваться как система полос или штрихов, каждый из которых может быть сформирован отдельно. Например, он может быть записан с помощью лазерного источника, в режиме, когда узкий лазерный луч формирует штрихи один за другим. Примерами данного подхода могут быть синтезированные голограммы [3] и голограммные решетки [4].

В обоих случаях возможно создание ГОЭ со сложной формой штрихов.

2. Переменная глубина штриха дифракционного элемента. Рельефно-фазовые отражательные решетки с непрерывно изменяющейся глубиной штриха используются в некоторых спектральных приборах [5]. Такое техническое решение позволяет регулировать дифракционную эффективность по всей площади элемента, тем самым увеличивая общую эффективность или позволяя построить систему сканирования.

3. Интерферометрия со сшиванием полей. Эта технология используется, например, при контроле оптических элементов, когда сложная оптическая поверхность должна измеряться с высокой точностью [6, 7]. Точность этого метода ограничена главным образом размером элементарного поля и количеством сшиваемых кадров. В контексте решаемой задачи данный метод предлагается использовать для формирования сложной интерференционной картины путем сшивания нескольких элементарных полей.

4. Новые голографические материалы. Недавно был разработан и успешно испытан ряд новых материалов для голографии. Среди других преимуществ некоторые из этих новых материалов обладают известным и точно калибруемым откликом на экспозицию и требуют меньше этапов последующей обработки. Например, новые фотополимеры для объемной голографии характеризуются воспроизводимостью зависимости модуляции показателя преломления от экспозиции [8, 9].

Следовательно, с использованием такого материала можно изготовить ГОЭ с заданной амплитудой модуляции показателя преломления. Это означает, что такими свойствами, как положение, ширина и форма кривой дифракционной эффективности, можно управлять.

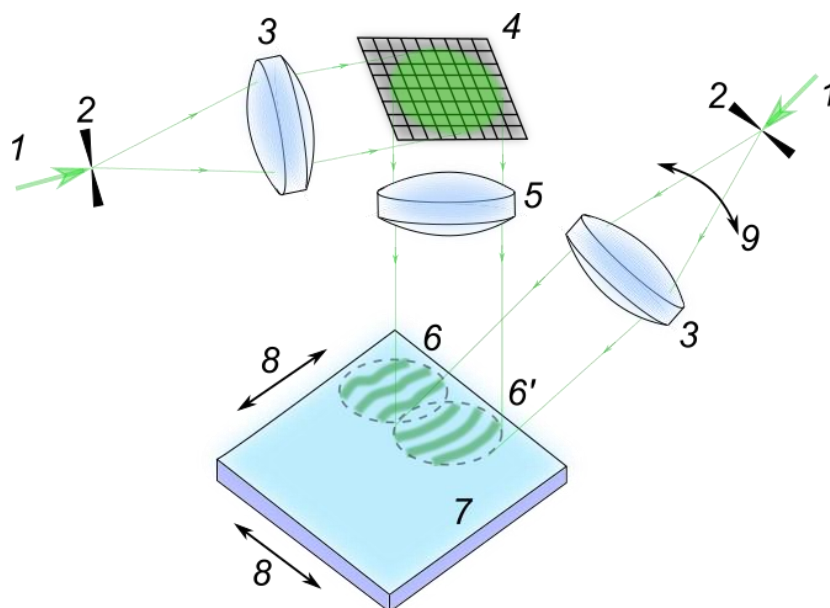
5. Активная и адаптивная оптика. Технологии активной оптики, например, деформируемые зеркала или пространственные модуляторы света (SLM, spatial light modulator) используются для коррекции aberrаций высоких порядков. В контексте данного исследования они могут быть применены для создания записывающего волнового фронта при изготовлении ГОЭ. Подобное использование было показано еще в [10] и иногда называется записью голограммной решетки второго поколения.

2. Концепция технологии композитных голограммных элементов

В рамках данного исследования рассматривается возможность развития и комплексного применения перечисленных технических решений и технологий для создания нового типа голограммных оптических элементов и оптических систем на их основе. Подобный элемент объединит преимущества указанных выше технологий и позволит значительно увеличить число коррекционных параметров, и, как следствие, повысить основные оптические характеристики изображающих систем.

Предлагаемые голограммные оптические элементы будут представлять собой голограммы, записываемые путем стыковки нескольких элементарных полей. Голограмма может быть объемно-фазовой или рельефно-фазовой. При этом в каждом элементарном поле изменяются следующие параметры:

- глубина профиля штриха или амплитуда модуляции показателя преломления,



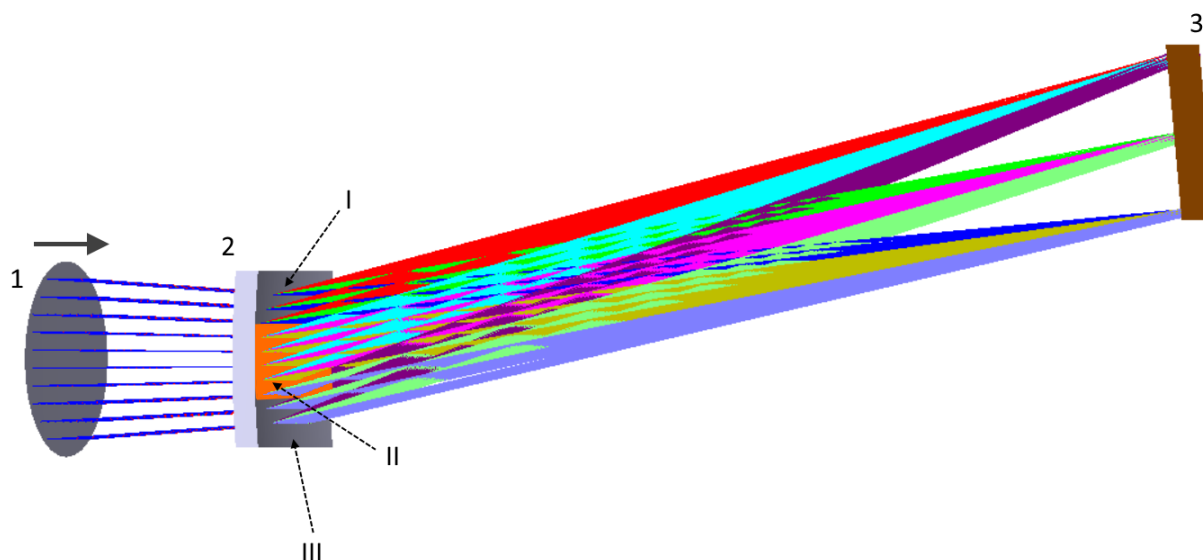
1 — пучок лазера, 2 — точечная диафрагма, 3 — коллиматор, 4 — деформируемое зеркало/пространственный модулятор света, 5 — вспомогательная проекционная ОС, 6 и 6' — элементарные поля записываемой голограммы, 7 — подложка, 8 — система механической развертки, 9 — поворотный механизм

Рис. 1. Принципиальная схема записи композитного голографического элемента

- форма профиля штриха или полосы,
- частота штрихов/полос,
- кривизна штрихов/полос и параметры неравномерности их периода.

Следовательно, такие параметры элемента, как дифракционная эффективность, спектральная селективность, угловая селективность, поляризационные, дисперсионные и аберрационные свойства могут контролироваться локально. Здесь и далее предлагаем называть такой оптический элемент композитным голограммным оптическим элементом КГОЭ.

Вариант принципиальной схемы записи КГОЭ представлен на рисунке 1. Излучение лазера 1 проходит через точечные диафрагмы 2 и коллимируется объективами 3. В одном из плечей интерференционной установки располагается устройство для управления волновым фронтом — деформируемое зеркало или пространственный модулятор света 4. Также, могут использоваться вспомогательные оптические элементы 5. Пучки, сформированные с их помощью, интерферируют, образуя картину штрихов в элементарном поле 6, которая регистрируется на подложке с фоточувствительным слоем 7. С помощью механизма развертки 8 интерференционная картина последовательно приводится на различные участки подложки. При этом за счет изменения профиля модулятора света изменяется картина штрихов и аберрационные свойства решетки в каждом из элементарных полей. С помощью поворотного механизма 9 могут изменяться углы наклона в схеме записи и, следовательно, частота штрихов и их наклон. Изменение времени экспозиции и/или мощности излучения при записи каждого элементарного поля позволит изменить параметры формируемой голографической структуры и ее дифракционную эффективность.



1 — падающее излучение, 2 — КГОЭ (I, II и III — элементарные поля), 3 — плоскость регистрации спектра

Рис. 2. Оптическая схема спектрографа с КГОЭ

3. Пример оптической схемы спектрографа

В качестве демонстрации некоторых преимуществ предложенного подхода рассмотрим оптическую схему спектрографа с плоским полем на основе вогнутой пропускающей голограммной решетки. Подобная схема с решеткой, записываемой двумя точечными источниками, была подробно рассмотрена в [11].

Схема работает в спектральном диапазоне 400–800 нм и имеет эквивалентное относительное отверстие 1 : 5. Она состоит из единственного оптического элемента — вогнутой пропускающей решетки, устанавливаемой в сходящемся пучке в нормальном падении. Расстояние от поверхности решетки до фокуса пучка (мнимой входной щели) составляет 200 мм. Рассматривается случай работы с входной щелью высотой 10 мм. Решетка наносится на вогнутой поверхности концентрического мениска с радиусом 200 мм. Мениск имеет толщину по оси 5 мм и выполнен из стекла К8. В качестве исходной конфигурации используем схему с решеткой, записываемой двумя точечными источниками с координатами (204,5 мм; 12°15′) и (200,7 мм; 2°2′) на длине волны 441,6 нм. При этом центр изображения спектра имеет координаты (204,9 мм; 13°53′), а его длина 34,1 мм.

При модификации данной схемы будем рассматривать композитную голограммную решетку, состоящую из трех элементарных полей размером 6 × 18 мм, смещенных относительно друг друга в меридиональной плоскости. Каждое из элементарных полей записывается в схеме подобной представленной на рисунке 1. Для формирования aberrированного волнового фронта используется деформируемое зеркало диаметром 35 мм, форма поверхности которого описывается стандартными полиномами Цернике $Z_4 - Z_{15}$. В обеих ветвях интерферометра записи предусмотрено изменение угла падения. Дополнительные оптические элементы для формирования волнового фронта не используются.

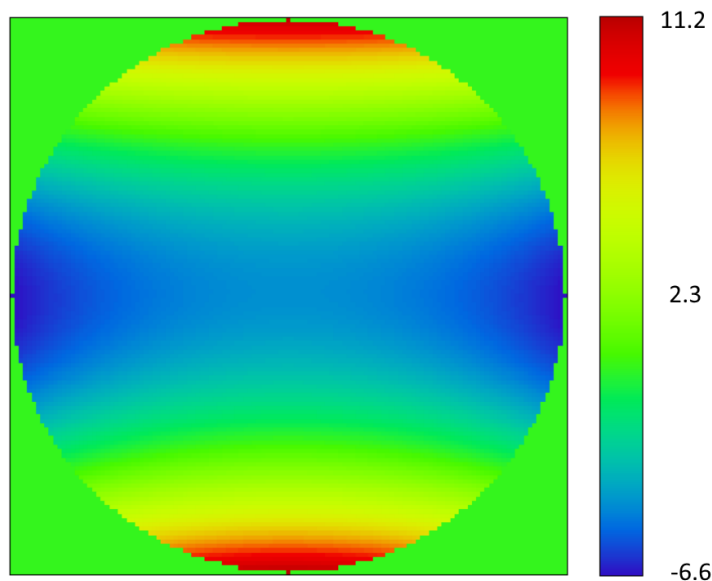


Рис. 3. Стрелка прогиба вспомогательного деформируемого зеркала (в мкм)

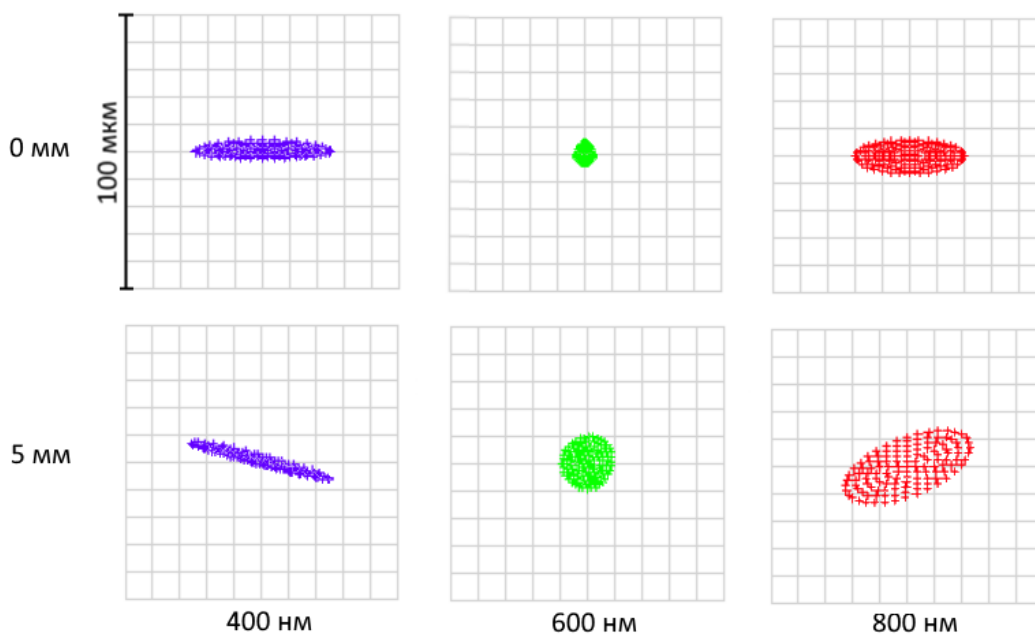


Рис. 4. Точечные диаграммы спектрографа с КГОЭ

Полученная оптическая схема приведена на рисунке 2.

Далее для каждого из элементарных полей проводится численная оптимизация геометрических aberrаций. Свободными параметрами являются коэффициенты, описывающие форму деформируемого зеркала и углы падения. В качестве ограничений указывается совпадение центров изображений, формируемых каждым из элементарных полей, а также сохранение линейной дисперсии.

Профиль деформируемого зеркала для записи центрального элементарного поля, найденный в результате оптимизации, показан на рисунке 3.

Табл. 1. Аберрации схемы спектрографа с КГОЭ

m , мм	M , мм	$\lambda = 600$ нм, $y' = 0$ мм		$\lambda = 400$ нм, $y' = -16,07$ мм		$\lambda = 800$ нм, $y' = 15,97$ мм	
		$\Delta y'$, мкм	$\Delta z'$, мкм	$\Delta y'$, мкм	$\Delta z'$, мкм	$\Delta y'$, мкм	$\Delta z'$, мкм
-8,5	0	29,1	0	43,3	0	56,7	0
8,5	0	41,6	0	-23,2	0	-64,5	0
0	8,5	2,8	28,3	3,5	247,7	0,3	198,6

Табл. 2. Аберрации исходной схемы спектрографа

m , мм	M , мм	$\lambda = 600$ нм, $y' = 0$ мм		$\lambda = 400$ нм, $y' = -17,35$ мм		$\lambda = 800$ нм, $y' = 16,74$ мм	
		$\Delta y'$, мкм	$\Delta z'$, мкм	$\Delta y'$, мкм	$\Delta z'$, мкм	$\Delta y'$, мкм	$\Delta z'$, мкм
-8,5	0	-34,4	0	42,0	0	69,2	0
8,5	0	47,9	0	-20,5	0	-78,6	0
0	8,5	3,1	31,4	3,8	275,5	0,6	221,2

Для оценки качества изображения, достигнутого в схеме, использовались точечные диаграммы и таблицы аберраций спектрографа. Точечные диаграммы для схемы с КГОЭ представлены на рисунке 4. Соответствующие им аберрации сведены в таблицу 1.

Для сравнения были рассчитаны аберрации исходной оптической схемы (таблица 2). Из сравнения результатов следует, что использование КГОЭ позволяет снизить аберрации в меридиональном сечении на величину до 18%, в сагиттальном сечении — до 10%.

Приведенные результаты демонстрируют некоторые принципы расчета и моделирования схем КГОЭ, а также потенциальные преимущества для задач коррекции аберраций на примере наиболее простой оптической схемы. Более подробный анализ потребует создания специальных методик и инструментов расчета и моделирования.

4. Перспективы развития и применения

Для реализации предложенной концепции необходимо провести исследования по следующим направлениям с использованием перечисленных ниже подходов и методов:

1. Моделирование КГОЭ, которое должно обеспечивать точный расчет как аберрационных характеристик, так и показателей дифракционной эффективности и пропускания. При этом разрабатываемые методики моделирования должны учитывать одновременное влияние конструктивных параметров оптического элемента, например, частота штрихов и их разворот в заданной точке апертуры, на обе группы характеристик.

2. Проектирование и оптимизация оптических систем на основе КГОЭ, создание методик расчета различных типов оптических систем на базе КГОЭ. В отличие от известных, новые методики расчета должны использовать целевые функции, включающие значения аберраций и коэффициента пропускания в различных точках апертуры и поля зрения, а кроме того, учитывать возросшее число свободных коррекционных параметров.

3. Преобразование расчетных параметров КГОЭ в технологические. Рассчитанные параметры голограммного элемента, описывающие форму и профиль штрихов/полос в каждом элементарном поле необходимо преобразовать в величины, непосредственно используемые

при изготовлении. При этом необходимо учесть технологически достижимые пределы для каждого из конструктивных параметров, число физически реализуемых степеней свободы, а также минимизировать возможные разрывы картины штрихов и профиля штриха на стыках элементарных полей.

4. Разработка технологии изготовления КГОЭ. Такая технология подразумевает использование двух волновых фронтов, один из которых является управляемым, и системы механического сканирования, позволяющей последовательно приводить получаемую интерференционную картину на различные участки подложки с фоточувствительным слоем. Наиболее перспективными для реализации образцов КГОЭ являются современные фотополимерные материалы для объемной голографии.

В перспективе результаты исследований могут быть использованы при создании таких оптико-электронных приборов как спектрометры высокого разрешения для научных исследований, компактные спектрометры лабораторного и промышленного применения, голограммные дисплеи различных типов (наголовные, шлемные, автомобильные) голографические датчики волнового фронта и др.

Заключение

Предложена концепция нового типа оптических элементов — композитных голографических оптических элементов. Концепция опирается на ряд существующих и перспективных технологий, а предложенный элемент — КГОЭ займет промежуточное положение между несколькими известными типами голографических элементов, объединив их преимущества. Возможность точного контроля и изменения характеристик голограммы для множества элементарных полей позволит учесть изменение условий записи и работы голограммы при больших значениях апертуры, поля зрения и спектрального диапазона, и создать оптические системы с улучшенными функциональными характеристиками.

Список источников

- [1] **Toal, V.** Introduction to holography / V. Toal. — NY: CRC Press, 2011. — 464 p.
- [2] **Palmer, C.** Diffraction grating handbook, 7th edition / C. Palmer, E. Loewen. — Rochester: CRC Newport Corp, 2014. — 352 p.
- [3] **Poleshchuk, A. G.** Combined computer-generated hologram for testing steep aspheric surfaces / A. G. Poleshchuk, et al. // Optics Express. — 2009. — Vol. 17. — P. 5420–5425.
- [4] **MacLachlan, D. G.** Mid-Infrared Volume Phase Gratings Manufactured using Ultrafast Laser Inscription / D. G. MacLachlan, R. R. Thomson, C. R. Cunningham, D. Lee // Optical Materials Express. — 2013. — Vol. 3. — P. 1616–1624.
- [5] **Lagarde, B.** On the contribution of gratings with laterally graded groove depths to the design and performances of SOLEIL soft X-ray monochromators / B. Lagarde, F. Sirotti, A. Taleb-Ibrahimi, C. Miron, F. Polack // Journal of Physics: Conference Series. — 2013. — Vol. 425. — P. 152022.
- [6] **Murphy, P.** Stitching Interferometry: A Flexible Solution for Surface Metrology / P. Murphy, G. Forbes, J. Fleig, P. Dumas, and M. Tricard // Optics & Photonics News. — 2003. — Vol. 14 (5). — P. 38–43.

- [7] **Huang, L.** Two-dimensional stitching interferometry for self-calibration of high-order additive systematic errors / L. Huang, T. Wang, J. Nicolas et al. // *Optics Express*. — 2019. — Vol. 27. — P. 26940–26956.
- [8] **Bruder, F.-K.** Precision holographic optical elements in Bayfol HX photopolymer / F.-K. Bruder; H. Bang; T. Fäcke et al. // *Proc. of SPIE*. — 2016. — Vol. 9771. — P. 977103.
- [9] **Zanutta, A.** Spectral multiplexing using stacked volume-phase holographic gratings — I / A. Zanutta, M. Landoni, M. Riva, A. Bianco // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Vol. 469. — № 2. — P. 2412–2422.
- [10] **Duban, M.** Recording method for obtaining high-resolution holographic gratings through use of multimode deformable plane mirrors / M. Duban, G. R. Lemaitre, R. F. Malina // *Applied Optics*. — 1998. — Vol. 37. — P. 3438–3439.
- [11] **Павлычева, Н. К.** Спектрограф с плоским полем на основе вогнутой про-пускающей голограммной дифракционной решетки / Н. К. Павлычева, Э. Р. Муслимов // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева*. — 2010. — №4. — С. 61–66.