

## 40. Мультиплексные брэгговские дифракционные решетки для световодов системы дополненной реальности

*М. В. Шишова, А. Ю. Жердев, Д. С. Лушников, В. В. Маркин, С. Б. Одинок*

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

В статье описана запись мультиплексных брэгговских дифракционных решеток для световодных дисплеев по методу оптического копирования с фазовой маски. Световоды в данном эксперименте изготовлены из фото термо рефрактивного стекла. Проводится сравнение записи с помощью рельефной и брэгговской фазовых масок. Экспериментально подтверждена эффективность применения рельефно-фазовой маски.

*Ключевые слова:* Брэгговские решетки, Дифракционные решетки, Мультиплексирование, Фото термо рефрактивное стекло, Световод, Волновод, Дополненная реальность.

*Цитирование:* Шишова, М. В. Мультиплексные брэгговские дифракционные решетки для световодов системы дополненной реальности / М. В. Шишова, А. Ю. Жердев, Д. С. Лушников, В. В. Маркин, С. Б. Одинок // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 253–263.

### Введение

В статье рассматриваются оптические волноводы, совмещенные с дифракционными решетками, которые представляют собой плоскопараллельные пластины. Внутри них излучение распространяется с помощью полного внутреннего отражения (ПВО). Дифракционные решетки могут быть рельефными или объемными, но угол дифракции внутри подложки должен удовлетворять условию ПВО. Такие волноводы применяются в дисплеях дополненной реальности [1, 2], интегрированных фотонных устройствах, для мультиплексирования с разделением по длине волны, оптических соединителях и оптических ответвителях и др. [3]. Представленные в статье волноводы с объемными дифракционными решетками относятся к плоским изображающим оптическим системам дополненной реальности. В конфигурациях таких систем на основе дифракционных решеток, дифракция света используется для введения излучения в стеклянную пластину. При этом применение объемных голографических решеток позволяет увеличить оптической эффективности системы [4, 5]. Объемные голографические решетки имеют высокую угловую и спектральную селективность, поэтому для реализации AR-дисплея на их основе требуется голографические материалы с хорошими свойствами по модуляции показателя преломления и пространственное мультиплексирование. Создание такого рода объемной решетки непосредственно внутри подложки является задачей исследования.

Исследование оптических волноводов, представленное в данной работе, основано на применении фото-термо-рефрактивного (ФТР) стекла в качестве голографической объемной среды. Этот материал является уникальным с точки зрения для интеграции фазовых дифракционных элементов с волноводной платформой [6]. ФТР стекло является отличным материалом для прозрачных AR дисплеев, поскольку позволяет избежать различных проблем в связи с внешними воздействиями (температурой, влажностью и давлением) [7]. Объемные брэгговские решетки, записанные в этом стекле, демонстрируют высокую угловую и спектральную селективность, высокую дифракционную эффективность в сочетании с высокой механической и оптической прочностью, высокая термическая и химическая стойкость (близкие к оптическому стеклу BK7). Фазовая структура формируется непосредственно внутри среды, поэтому нет необходимости ламинировать волновод, чтобы он был устойчивым к различным чистящим средствам. Стеклоподложка представляет собой голографический материал, поэтому мы можем записывать голограммы по всей толщине подложки, что в текущем исследовании составляет пару миллиметров. Неоспоримым преимуществом ФТР стекла для голографии является отсутствие усадки. Тогда записанная структура будет проявлена без искажений и будет соответствовать установленным параметрам.

Создание мультиплексированных брэгговских решеток для волноводов из ФТР стекла является целью исследования. Для этого предложен метод записи с помощью фазовой маски. Этот метод стабилен и удобен для получения брэгговских дифракционных решеток высокого разрешения [3, 8–11]. Обычно для этой цели используется коллимированный лазерный пучок, когда он падает по нормали или в соответствии с условием Литрова [8, 9]. Но эта техника записи через фазовую маску не ограничена этими двумя случаями. Представленные исследования отличаются конической подсветкой фазовой маски одним записывающим лазерным лучом для изготовления наклонных объемных решеток AR-волноводных дисплеев. В статье рассматриваются два типа фазовых масок: неселективные рельефно-фазовые дифракционные решетки и селективные объемные дифракционные решетки. Чтобы дать рекомендации о том, как их применять, проводится сравнение на базе дифракционных характеристик изготовленных одиночных и мультиплексированных брэгговских решеток. Чтобы подтвердить эффективность предложенного метода, дифракционные волноводы были успешно изготовлены.

### 1. Принципы записи

Запись с использованием фазовой маски обладает рядом преимуществ по сравнению со стандартной интерференционной записью, когда реализован интерферометр с делением по амплитуде. Существует несколько аргументов в пользу применения фазовой маски независимо от его типа:

1. Для обеспечения высоких частот брэгговских решеток требуются высокие углы сведения записывающих пучков [12]. Это легко реализовать с помощью дифракционной решетки в качестве фазовой маски, где углы схождения представляют собой углы дифракции.

2. Плоский равномерный волновой фронт должен быть создан только для одной ветви. В описанном эксперименте объемные решетки изготавливаются в широком пучке диаметром не менее 50 мм. Запись всей площади дифракционного волновода регистрируется одновременно. Создание однородного плоского волнового фронта такого размера становится нетривиальной задачей для ультрафиолетового излучения.

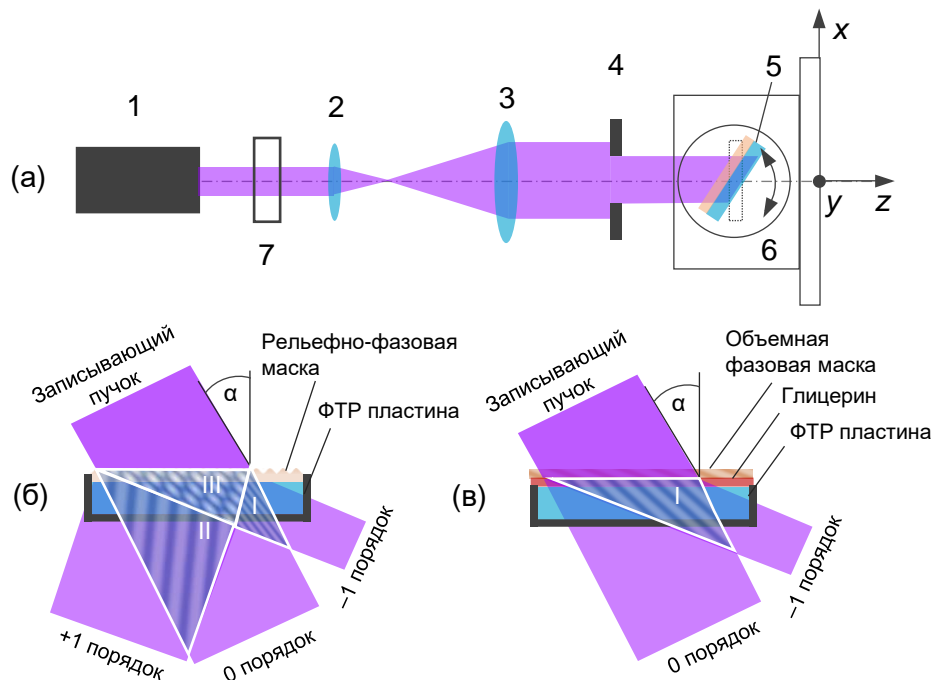
3. Требования к виброустойчивости установки записи снижены. Поскольку образец и шаблон объединены в единый элемент, механические колебания возникают относительно «сэндвича» фазовой маски и ФТР подложки, и интерференционная картина не смещается во время записи из-за этих вибраций. Необходимо стабилизировать относительное смещение механических компонентов в схеме только в одной ветви. Для сравнения, при получении голографических дифракционных решеток вибрации не должны превышать погрешность изготовления периода дифракционной решетки. Этот момент выгоден для продолжительных экспозиций.

### 1.1. Запись с помощью фазовой маски

В предложенном методе записи дифракционные решетки применяются как фазовые маски для создания интерференционной картины в ближнем поле внутри фоточувствительной подложки. Одиночный когерентный лазерный пучок освещает фазовую маску и формирует накладывающиеся пучки в дифракционных порядках, таким образом фазовая маска копируется в толстослойный голографический материал. Это также называется голографическим или оптическим копированием [13, 14], если длина волны записывающего лазера при копировании такая же, как и при записи фазовой маски. В этом разделе подробно описываются общие рекомендации по записи через рельефную и объемную фазовые маски с несколькими последовательными экспозициями [15]. Рисунок 1а иллюстрирует схему настройки записи.

Излучение с длиной волны 0,325 мкм (He–Cd лазер 1) расширяется и коллимируется с помощью линз 2 и 3. Диафрагма 4 пропускает центральную часть записывающего луча с удовлетворительной равномерностью интенсивности излучения. «Сэндвич» с фазовой маской и ФТР стеклянной подложкой 5 установлен на моторизованном угловом позиционере 6, который контролирует угол падения  $\alpha$ . Сначала когерентная плоская волна падает на одномерную решетку (фазовую маску) в плоскости, нормальной к штрихам решетки. Область экспонирования в записывающем пучке контролируется смещением в плоскости  $xy$ . Вся процедура записи с необходимыми угловыми и планарными положениями осуществляется с помощью программного управления приводами в стенде записи. Доза излучения при экспозиции обеспечивается с помощью электромеханического затвора 7.

На рисунках 1б и 1в представлены области записи в ближнем поле, сформированные после рельефной и объемной решеток соответственно. Фазовая маска должна быть непосредственно наложена на волновод или стыковаться с подложкой с помощью иммерсионной жидкости, чтобы правильно реализовать условия сведения для больших углов [16]. Дифракция на



1 — He–Cd лазер, 2 и 3 — линзы, 4 — диафрагма, 5 — «сэндвич» с фазовой маской и световодом в наклонном освещении, 6 — угловой позиционер, 7 — затвор

**Рис. 1.** Схема записи. Область записи ближнего поля, образованная при однократной экспозиции (б) рельефно-фазовой маски и (в) брэгговской фазовой маски.

неселективной рельефной решетке (рисунок 1б) в качестве фазовой маски приводит к появлению трех пучков, которые распространяются внутри стеклянной подложки: проходящий (0-й порядок дифракции) и два дифрагированных (+ 1-й и –1-й порядки). Поэтому в подложке формируются три области интерференции: область I соответствует интерференции +1-го и 0-го порядков дифракции, область II с интерференцией 0-го и –1-го порядков дифракции и область III с интерференцией всех трех + 1-го, 0-го и –1 дифракционных порядков. На практике область III занимает большую часть объема записи из-за относительно небольшой толщины волновода ( $\approx 2$  мм) и состоит из трех периодичностей. Рабочая периодичность дифракционного волновода формируется интерференцией 0-го и –1-го порядка дифракции. Дифракция на селективной объемной решетке (рисунок 1в) в качестве фазовой маски приводит к формированию двух пучков, которые распространяются внутри подложки: проходящая волна (0-й порядок) и дифрагированная волна (–1-й порядок).

Этапы подготовки включают почернение его задней поверхности и граней, как представлено на рисунке 1б и 1в. Чернение необходимо для устранения неблагоприятных переотражений при последующей голографической записи. Постэкспозиционная процедура для ФТР стекла заключается из высокотемпературной обработке ( $\approx 500^\circ\text{C}$ ). Завершающим этапом является обесцвечивание путем прямого сканирования с использованием импульсного фемтосекундного мощного излучения зеленого лазера ( $\lambda = 515$  нм), необходимого для повышения

прозрачности изготавливаемой волноводной пластины. Отбеливание происходит за счет фотодеструкции наночастиц серебра и не влияет на записанную структуру.

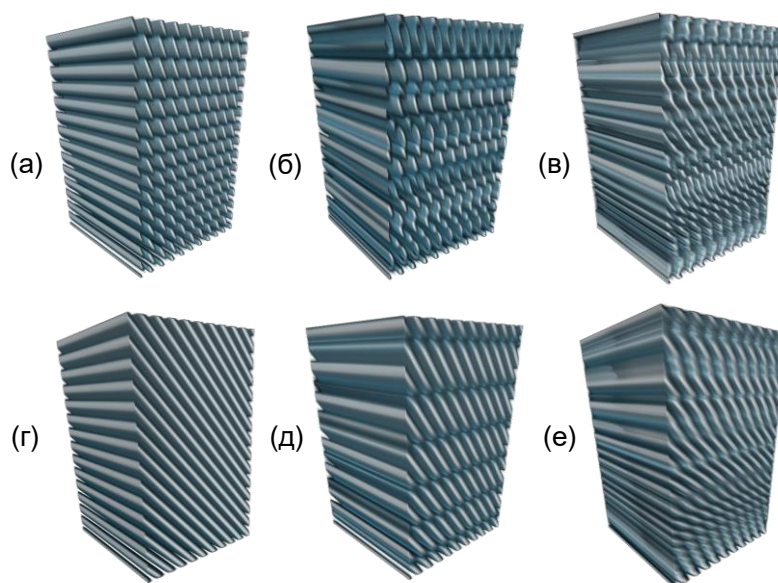
## 1.2. Мультиплексирование

Брэгговские дифракционные элементы для дисплеев дополненной реальности состоят из нескольких мультиплексированных объемных решеток. На рисунке 1 представлен шаг единичной экспозиции. Угловой шаг для мультиплексирования определяется угловой селективностью записанной брэгговской решетки и спектральным диапазоном светодиода при работе волновода. Экспериментальная задача при мультиплексировании заключается в том, чтобы эффективно использовать модуляцию показателя преломления  $\Delta n$ , которая отвечает за весь динамический диапазон. Он распределяется при  $N$ -кратном мультиплексировании на  $n_1, n_2, \dots, n_N$ . Дифракционная эффективность отдельной решетки в мультиплексе уменьшается примерно в квадратный корень из  $N$  раз.

Согласно результатам интерполяции экспериментальных измерений показатель преломления стекла определяется функцией  $n(\lambda) = 4332 \cdot \lambda^{-2} + 1,484$  до записи и  $n(\lambda) = 4353 \cdot \lambda^{-2} + 1,483$  после термообработки. Показатель преломления неэкспонированной области после термообработки соответствует показателю преломления до записи. Показатели преломления и модуляции показателя преломления для разных спектральных диапазонов, следующие:  $n_B = 1,5035$ ,  $\Delta n_B = 4,51 \cdot 10^{-4}$  для длины волны  $\lambda_B = 461$  нм;  $n_G = 1,4991$ ,  $\Delta n_G = 4,61 \cdot 10^{-4}$  для  $\lambda_G = 520$  нм;  $n_R = 1,4936$ ,  $\Delta n_R = 4,74 \cdot 10^{-4}$  для  $\lambda_R = 640$  нм.

Рисунок 2 иллюстрирует результаты моделирования для регистрируемых интерференционных структур. Рисунки 2а–2в соответствует структурам, полученным с помощью поверхностной фазовой маски. Одиночная запись соответствует «поленнице», как показано на рисунке 2а. Увеличение количества мультиплексов приводит к наложению по интенсивности структур, полученных при единичном экспонировании. Это проиллюстрировано на рисунке 2б для пяти мультиплексов и на рисунке 2в для десяти мультиплексов. Рисунки 2г–2е соответствует структурам, полученным с помощью брэгговских фазовых масок. При единичной записи формируется обычная наклонная объемная дифракционная решетка (рисунок 2г). На рисунках 2д и 2е показаны результирующие изменения показателя преломления после процедуры мультиплексирования для пяти и десяти экспонирований соответственно.

Мультиплексирование более целесообразно для применения поверхностной фазовой маски. Перестановка интерференционной записи, настроенной на широкий диапазон углов мультиплексирования, является сложной. Но записав фазовую маску один раз и выполнив процедуру копирования, мы поворачиваем только один компонент в записывающем пучке. Фоторезистивную рельефно-фазовую маску можно нанести непосредственно на ФТР пластину. ФТР стекло не является светочувствительным к излучению, что актиночному для фоторезиста. В другом случае селективная фазовая маска не может быть использована для углового мультиплексирования, необходимо заменить фазовую маску для каждого нового мульт-



**Рис. 2.** 3D-модели записанных объемных структур с помощью рельефно-фазовой маски для однократной экспозиции (а), для пяти последовательных экспозиций (б) и для десяти последовательных экспозиций (в); с помощью брэгговских фазовых масок: для однократной экспозиции (г), для пяти последовательных экспозиций (д) и для десяти последовательных экспозиций (е)

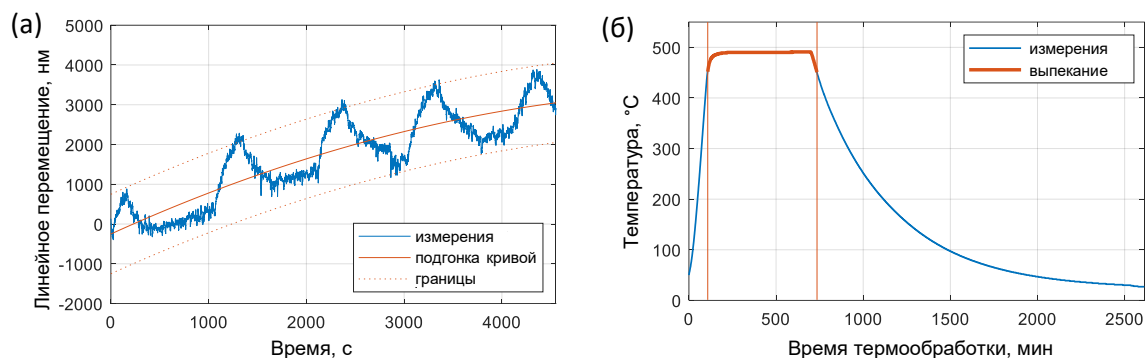
типлексирования и, соответственно, создать столько масок, сколько необходимо для мультиплексирования. Расчет самой фазовой маски не является предметом представленных исследований. Он основан на уравнении дифракции и начинается с периодов и углов наклона записываемой брэгговской решетки, которые необходимо реализовать.

## 2. Экспериментальные результаты

### 2.1. Условия записи и постобработки

Стенд по голографическому копированию является виброустойчивым. Запись проходила в вибрационных условиях, показанных на рисунке 3а. На графике показаны отклонения, контролируемые микроинтерферометром в течение 1,25 часа. Измерения проводились с использованием датчика перемещения Numerical Vision Displacement Meter и лазера Cobolt Flamenco DPSS (660 нм, 100 мВт). Время одной экспозиции с мультиплексной записью намного меньше, оно длится две минуты. Линейные смещения значительно превышают период записанных брэгговских дифракционных решеток.

Постэкспозиционная обработка для ФТР стекла заключается в высокотемпературной выдержке в печи. В представленных экспериментах использовалась электрическая муфельная печь SNOL 7,2 / 1100L с керамической камерой. Выпекание заняло 10 часов при температуре  $\approx 500^\circ\text{C}$ , график температуры показан на рисунке 3б. Для контроля температуры в процессе обработки был использован термометр температуры Center 520.



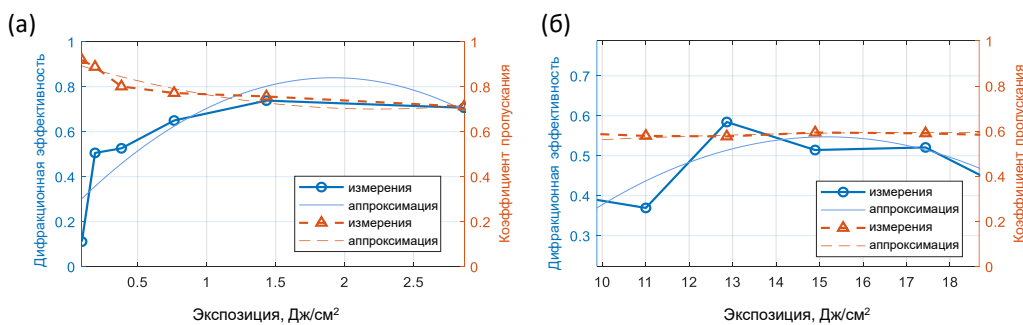
**Рис. 3.** Вибрационные условия при записи в виде зависимости линейного перемещения образца в зависимости от времени (а) и зависимость температуры в печи в зависимости от времени термообработки (б)

## 2.2. Измерения дифракционной эффективности

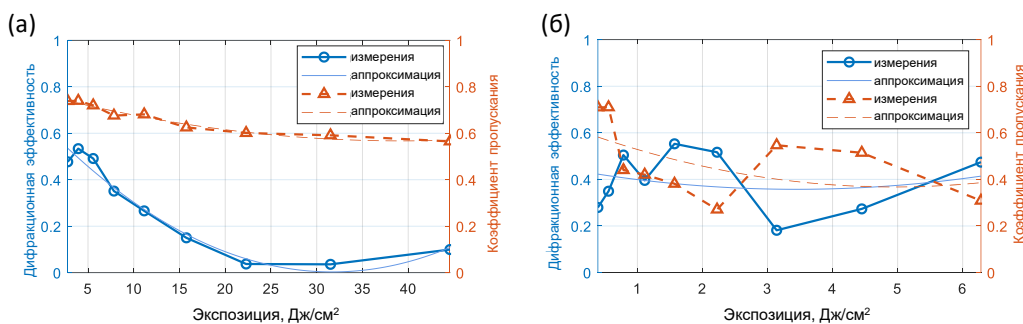
В этом разделе рассматриваются эксперименты по записи с позиции сравнения двух типов фазовых масок. Дифракционная эффективность представлена как функция от дозы экспозиции. Фазовые маски были сконструированы таким образом, чтобы создавать волноводную моду зеленого спектра для углов падения от  $-15^\circ$  до  $15^\circ$  для удовлетворения условий ПВО внутри подложки. Углы записи для мультиплексирования варьировались в диапазоне от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ .

На рисунках 4 и 5 показаны экспозиционные кривые, полученные при проведении записи через рельефные и брэгговские фазовые маски соответственно. Для записи использовался He–Cd лазер Kimmon IK3501R-G мощностью 50 мВт и длиной волны 325 нм. Показанные на графиках значения экспозиции относятся к излучению, приходящему на фазовую маску, после расширения пучка мощность излучения составляла около 2 мВт. Распределение энергии в дифракционных порядках отвечает за контраст при записи. Максимальный единичный контраст может быть достигнут только при использовании брэгговской фазовой маски. Синие экспозиционные кривые для левой оси представляют зависимость дифракционной эффективности от дозы излучения, для правой оси красным цветом показана аналогичная зависимость для коэффициента пропускания, параметра, важного для дисплеев дополненной реальности. Особенностью волноводных дифракционных решеток является сложность прямых измерений дифракционной эффективности из-за того, что первый дифракционный порядок «захвачен» внутрь подложки. Поэтому исследование основано на косвенном контроле ослабления по измерению мощности проходящего луча. Измерения проводились с помощью зеленого лазера MSL-FN-532 (200 мВт), измерителя мощности Ophir Photonics PD300 и поворотного позиционера Standa 8MR191 с разрешением  $4,5''$  с шагом  $1/8$ .

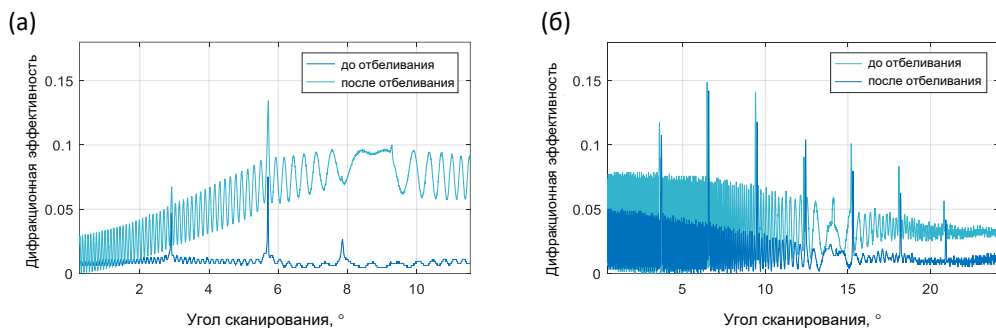
Показано, что для обоих типов фазовых масок рационально использовать дозы излучения  $1-2 \text{ J/cm}^2$ . На рисунке 6 показаны результаты косвенного измерения для мультиплексных брэгговских дифракционных решеток и представлено влияние отбеливания. Хотя фазовые маски Брэгга должны обеспечивать лучший контраст при записи, хорошие результаты по



**Рис. 4.** Экспозиционные кривые для решеток, изготовленных с помощью рельефно-фазовой маски для низких (а) и высоких (б) экспозиций



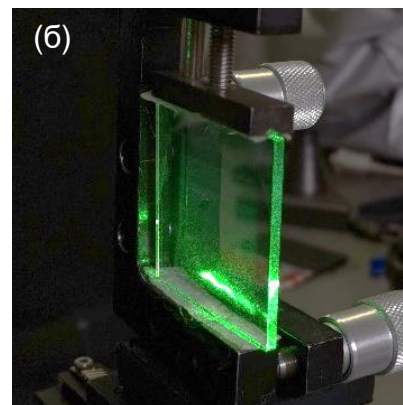
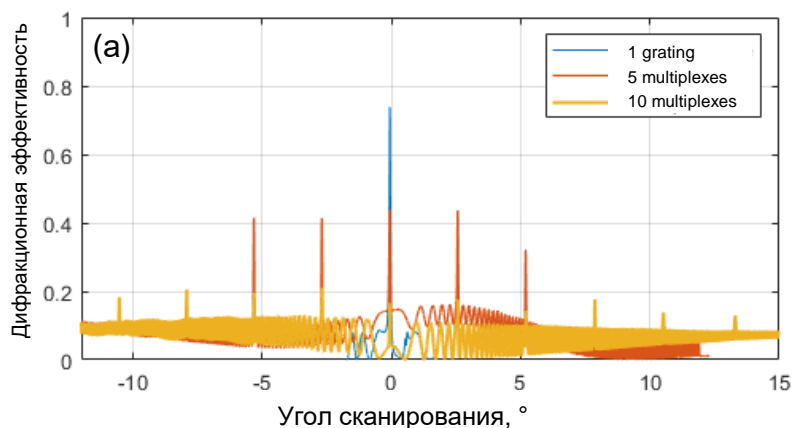
**Рис. 5.** Экспозиционные кривые для решеток, изготовленных с помощью брэгговской фазовой маски для широкого диапазона экспозиций (а) и для низких экспозиций (б)



**Рис. 6.** Угловая характеристика дифракционной эффективности для мультиплексных брэгговских решеток, записанных с помощью селективных фазовых (а) и рельефно-фазовой (б) маскок

мультиплексированию не были достигнуты. Дальнейший эксперимент по увеличению количества мультиплексов проводился только для рельефно-фазовой маски. Отбеливание осуществлялось импульсным 250 фс лазером Avesta ATsG 1030C с энергией импульса 10 мДж на длине волны 515 нм с использованием прямого сканирования лучом со скоростью 0,02 мм/с. Благодаря фотодеструкции наночастиц серебра внутри ФТР стекла это способствует уменьшению рассеяния и поглощения, увеличивая прозрачность. Дифракционная эффективность возросла на пару процентов, а пропускание на 10–12%.





а) Угловая характеристика дифракционной эффективности для мультиплексных брэгговских решеток, записанных с помощью фазовой маски

б) Внешний вид световода

Рис. 7

Дифракционная эффективность фазовой маски определяет контраст формируемой интерференционной структуры. Контраст должен быть максимальным из-за эффективного использования динамического диапазона показателя преломления ФТР стекла. Моделирование показало, что даже при очень низкой дифракционной эффективности рельефно-фазовой решетки (в пределах 3%) контраст интерференционной картины при трехлучевой интерференции остается выше 0,6.

Рисунок 7а показывает результат мультиплексирования при использовании рельефной фазовой маски. Показано как увеличение количества мультиплексов влияет на дифракционную эффективность при сохранении суммарной экспозиции. Дифракционная эффективность единичной решетки показано синим. Красным и желтым показано распределение дифракционной эффективности для пяти и десяти мультиплексных дифракционных решеток соответственно. Эксперименты показали, что для применяемого 2 мм волновода удалось достичь дифракционную эффективность 10–20% в каждом из 10 мультиплексов. На рисунке 7б показан внешний вид полученного волновода с волноводной модой.

### Заключение

В работе описана мультиплексная запись в ФТР стеклах через фазовые маски. В ходе исследования проводилось сравнение рельефно-фазовой неселективной и объемной селективной фазовых масок. Ожидалось, что применение брэгговской решетки в качестве фазовой маски приведет к более эффективной модуляции показателя преломления среды, когда можно добиться выравнивания дифракционной эффективности в двух дифракционных порядках. Тем не менее, трудности, связанные с нанесением иммерсионной жидкости и стыковкой различных селективных масок, усложняют процесс и оказывают негативное воздействие. В ходе эксперимента не удалось достичь положительных результатов в мультиплексировании с использованием брэгговских фазовых масок из-за увеличения технологической сложности.

Для рельефной фазовой маски, несмотря на неравенство дифракционной эффективности в порядках, обеспечивается качественная мультиплексная запись. Такие фазовые маски показывают те же результаты по экспозиции, что и брэгговские фазовые маски, но их применение намного удобнее благодаря свободному контролю угла записи при отсутствии угловой селективности маски. Голографическое копирование рельефно-фазовой маски является подходящим методом мультиплексной записи для наклонных объемных дифракционных решеток.

Представленный метод уменьшает период регистрируемых фазовых структур в 1,5 раза по сравнению с периодом фазовой маски и не требует сильной виброизоляции из-за отсутствия интерферометрических ветвей в оптической схеме записи. Представленный метод можно применять для записи брэгговской решетки в оптических волокнах. Исследуемые мультиплексированные объемные решетки могут быть адаптированы для передачи изображения для плоских AR волноводов. ФТР стекло помогает интегрировать объемные голографические решетки внутри плоской диэлектрической подложки.

### Благодарность

Авторы выражают благодарность Владимиру Маркину за проведение расчетов фазовых масок, Дмитрию Кузьмину, Павлу Ханевичу и Екатерине Дроздовой за помощь в технических вопросах. Авторы также благодарят Николая Никонорова и Сергея Иванова за консультации по работе с фото термо рефрактивными стеклами.

### Список источников

- [1] **Zhang, Y.** Development of planar diffractive waveguides in optical see-through head-mounted displays / Y. Zhang, F. Fang // Precision Engineering. — 2019. — Vol. 60. — P. 182–496.
- [2] **Lee, Y.-H.** Prospects and challenges in augmented reality displays / Y.-H. Lee, T. Zhan, S.-T. Wu // Virtual Reality & Intelligent Hardware. — 2019. — Vol. 1. — № 1. — P. 10–20.
- [3] **Hsu, F.-H.** Prism-hologram-prism sandwiched recording method for polarization-selective substrate-mode volume holograms with a large diffraction angle / F.-H. Hsu, C.-Y. Han, K.-H. Chen, K.-Y. Hsu, J.-H. Chen // Optics Express. — 2018. — Vol. 26. — № 16. — P. 20534–20543.
- [4] **Yu, C.** Highly efficient waveguide display with space-variant volume holographic gratings / C. Yu, Y. Peng, Q. Zhao, H. Li, and X. Liu // Applied Optics. — 2017. — Vol. 56. — № 36. — P. 9390–9397.
- [5] **Shen, Z.** Volume holographic waveguide display with large field of view using a Au-NPs dispersed acrylate-based photopolymer / Y.-H. Lee, T. Zhan, S.-T. Wu // Optical Materials Express. — 2020. — Vol. 10. — № 2. — P. 312–322.
- [6] **Odinokov, S. B.** Augmented reality display based on photo-thermo-refractive glass planar waveguide / S. B. Odinokov, M. V. Shishova, V. V. Markin, D. S. Lushnikov, A. Y. Zherdev, A. B. Solomashenko, D. V. Kuzmin, N. V. Nikonorov, S. A. Ivanov // Optics Express. — 2020. — Vol. 28. — № 12. — P. 17581–17594.
- [7] **Nikonorov, N.** New Photo-Thermo-Refractive Glasses for Holographic Optical Elements: Properties and Applications / N. Nikonorov, S. Ivanov, V. Dubrovin, A. Ignatiev // Holographic Materials and Optical Systems. — 2017. — P. 435–461.
- [8] **Park, T.-H.** Polymer-waveguide Bragg-grating devices fabricated using phase-mask lithography / T.-H. Park, S.-M. Kim, M.-C. Oh // Current Optics and Photonics. — 2019. — Vol. 3. — № 5. — P. 401–407.

- [9] **Weichelt, T.** Resolution enhancement for advanced mask aligner lithography using phase-shifting photomasks / T. Weichelt, U. Vogler, L. Stuerzebecher, R. Voelkel, U. D. Zeitner // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22. — №13. — P. 16310–16321.
- [10] **Smith, B. W.** Design and analysis of a compact EUV interferometric lithography system / B. W. Smith // *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*. — 2009. — Vol. 8. — №2. — P. 021207.
- [11] **Shaoxin, S.** Volume holographic waveguide display with large field of view using a Au-NPs dispersed acrylate-based photopolymer / S. Shaoxin, X. Ren, S. Liu, Z. Yang, Y. Zhang // *Optical Engineering*. — 2013. — Vol. 52. — №9. — P. 095103.
- [12] **Bobrinev, V. I.** Investigation of the properties of a beam reconstructed from volume holographic optical elements used in optical observation devices // V. I. Bobrinev, M. S. Kovalev, S. B. Odinsonov, G. R. Sagatelyan // *Russian Physics Journal*. — 2016. — Vol. 52. — №9. — P. 1457–1466.
- [13] **Ванин, В. А.** Копирование голограмм (обзор) / В. А. Ванин // *Квантовая электроника*. — 1978. — Том 5. — №7. — С. 1413–1428.
- [14] **Одиноков, С. Б.** Запись брэгговских дифракционных решеток в фоточувствительных материалах методом оптического копирования // С. Б. Одиноков, А. Ю. Жердев, М. В. Шишова, А. Б. Соломашенко, Д. С. Лушников, В. В. Маркин // *Квантовая электроника*. — 2020. — Том 50. — №7. — С. 653–657.
- [15] **Zhai, Q.** Investigation on mechanism of multiple holographic recording with uniform diffraction efficiency in photopolymers / Q. Zhai, S. Tao, T. Zhang, X. Song, D. Wang // *Optics Express*. — 2009. — Vol. 17. — №13. — P. 10871–10880.
- [16] **Bourgin, Y.** 100 nm period grating by high-index phase-mask immersion lithography / Y. Bourgin, Y. Jourlin, O. Parriaux, A. Talneau, S. Tonchev, C. Veillas, P. Karvinen, N. Passilly, A. R. M. Zain, R. M. De La Rue, J. Van Erps, D. Troadec // *Optics Express*. — 2010. — Vol. 18. — №10. — C. 10557–10566.