

На правах рукописи
УДК 535.421

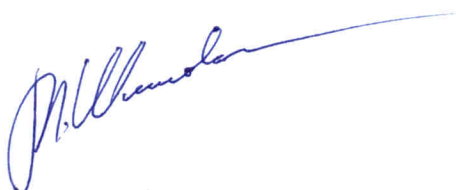
Шишова Мария Владимировна

**Метод углового мультиплексирования дифракционных решеток при
получении световодов из фото-термо-рефрактивного стекла для
оптических устройств дополненной реальности**

Специальность: 2.2.6

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва — 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: **Барышников Николай Васильевич**,
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой лазерных и оптико-электронных систем
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Грейсух Григорий Исаевич**,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой физики и химии ФГБОУ ВО
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
Путилин Андрей Николаевич,
кандидат физико-математических наук, и. о.
заведующего лабораторией сверхбыстро-
действующей оптоэлектроники и обработки
информации Физического института
им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
университет ИТМО»

Защита диссертации состоится 23 апреля 2025 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.07 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваш отзыв на автореферат диссертации, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.331.07 по адресу 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н. Э. Баумана (НИУ).

Телефон для справок: +7(499)263-64-44.

Автореферат разослан «____» _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.07
к. т. н., доцент

Д. Г. Денисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Оптические устройства дополненной реальности широко применяются в качестве систем отображения информации для введения данных в зрительное поле человека. Такие устройства необходимы для предоставления визуальных инструкций при сложных ручных операциях в медицине, строительстве и образовании, а также для отображения необходимой пользователю знако-символьной информации. Дифракционные световоды являются одним из основных компонентов оптических схем для наголовных устройств дополненной реальности, реализуемых в виде очков, шлемов или монокуляров, поскольку имеют минимальные массогабаритные параметры. Они представляют собой стеклянные плоскопараллельные пластины, в которых излучение вводится и выводится с помощью нанесенных на поверхность дифракционных оптических элементов (ДОЭ), которые в свою очередь выполняются в виде совокупности двумерных дифракционных решеток (2D-ДР) или трехмерных дифракционных решеток (3D-ДР), а излучение внутри дифракционного световода распространяется посредством полного внутреннего отражения (ПВО).

В современных серийно выпускаемых оптических устройствах дополненной реальности на базе дифракционных световодов (Microsoft HoloLens, Magic Leap, WaveOptics, Digilens, Dispelix и др.) для формирования ДОЭ используются фоточувствительные материалы (галогенидосеребряные фотоматериалы, фотополимеры, фоторезисты, УФ-отверждаемые полимерные композиции и др.), которые чувствительны к механическим и климатическим воздействиям (влажность, температура). Поэтому их необходимо герметизировать с помощью дополнительных стеклянных пластин для эксплуатации в реальных условиях. Кроме того, трехмерные фоточувствительные среды (например, галогенидосеребряные материалы, бихромированная желатина) обладают усадкой толщины регистрирующего слоя вследствие конверсии вещества в ходе фотохимических процессов. Неоптимальные условия эксплуатации могут привести к изменению параметров дифракционных световодов и ДОЭ и, следовательно, к ухудшению характеристик и параметров изображения в устройстве дополненной реальности.

Этот недостаток может быть устранен за счет применения альтернативного фоточувствительного материала — фото-термо-рефрактивного стекла (ФТР-стекла), прежде серийно не выпускаемого для создания дифракционных световодов. ФТР-стекло обладает свойствами бесцветного оптического материала (марки К8), не обладает усадкой и не чувствительно к изменению внешней температуры в диапазоне от -20°C до $+100^{\circ}\text{C}$ и влажности окружающей среды, поэтому их применение может позволить полностью интегрировать ДОЭ внутрь световодной пластины и сформировать монолитный дифракционный световод. Данный фоточувствительный материал позволяет создавать 3D-ДР с высокой дифракционной эффективностью, но в то же время высокой спектрально-угловой энергетической селективностью. Последнее означает, что 3D-ДР, сформированные в пластине из ФТР-стекла, будет преобразовывать излучение в узкой ширине спектральной линии и в узком пространственно-

угловом диапазоне ввода-вывода излучения из дифракционного световода, что может ограничивать угловое поле зрения оптического устройства дополненной реальности. Угловое поле зрения является одной из ключевых характеристик оптических устройств дополненной реальности и определяется как двойной угол 2ω обзора, обеспечиваемый оптической системой.

Разработка систем дополненной реальности с элементами голограммной оптики из ФТР-стекла требует решения широкого круга задач по производству этого материала с высокой голографической чувствительностью, созданию методов расчета оптических систем, реализации голографических стенов записи и др. Исследования изображающих систем, включающих оптические элементы из ФТР-стекла, ведутся в России в Университете ИТМО (Россия) под руководством проф. Н. В. Никонорова и в Университете Центральной Флориды (США) под руководством Л. Б. Глебова, а также в МГТУ им. Н. Э. Баумана. Так, например, в лаборатории современных фотонных материалов и технологий ИТМО решены задачи по созданию ФТР-стекла с высокой голографической чувствительностью, а также получены результаты по реализации световода для монокуляра дополненной реальности с угловым полем 7° . В США по заказу General Motors ведется разработка индикатора лобового стекла из ФТР-стекла, но это решение не относится к реализации малогабаритного устройства.

Вместе с тем, вопрос о реализации ввода и вывода излучения для световода из ФТР-стекла с помощью 3D-ДР в поле зрения выше 10° остается нерешенным. Угловое поле зрения такого дифракционного световода может быть существенно расширено за счет использования углового мультиплексирования при записи ДОО путем наложения 3D-ДР под разными углами в одной области пространства дифракционного световода. Тогда каждая мультиплексированная 3D-ДР в составе ДОО будет формировать отдельную угловую зону в едином угловом поле зрения. Кроме того, при использовании методов голографии для записи дифракционных световодов и ДОО в их составе, предметная волна должна быть согласована с условием ПВО и распространяться внутри подложки, что значительно усложняет голографический стенд записи. Рассмотренные проблемы могут быть оптимальным образом решены за счет модификации существующих методов расчета и записи 3D-ДР.

Поэтому создание дифракционных световодов на основе ФТР-стекла, которые преобразуют излучение именно в широком угловом поле за счет углового мультиплексирования, является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является разработка метода углового мультиплексирования при записи 3D-ДР для получения дифракционного световода в ФТР-стекле, обеспечивающего широкое угловое поле зрения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. На основе проведенного анализа оптических схем устройств дополненной реальности и существующих методов записи 3D-ДР выработаны рекомендации по проектированию дифракционного световода из ФТР-стекла и на его основе предложена оптическая схема для устройства дополненной реальности.

2. Разработана оригинальная математическая модель преобразования излучения посредством ДОО в виде мультиплексированных 3D-ДР в ФТР-стекле, согласно которой каждая из наложенных 3D-ДР формирует определенную угловую зону в общем угловом поле зрения.

3. Разработан двухступенчатый метод углового мультиплексирования 3D-ДР в дифракционных световодах из ФТР-стекла с применением фазовых масок, не требующий строгой виброизоляции: на первом этапе получают нанесенную на световод фазовую маску в виде рельефно-фазовой дифракционной решетки, сформированную в фоторезисте; на втором этапе в объеме световода из ФТР-стекла формируется фазовый ДОО в виде нескольких наложенных 3D-ДР посредством их углового мультиплексирования при освещении фазовой маски УФ-излучением, актиничным для ФТР-стекла.

4. Разработаны экспериментальные стенды для получения дифракционных световодов с угловым мультиплексированием 3D-ДР с помощью фазовых масок, а также измерительные стенды для их дифрактометрического контроля угловой селективности и дифракционной эффективности.

5. Проведены экспериментальные исследования по записи и угловому мультиплексированию 3D-ДР в дифракционных световодах из ФТР-стекла.

6. Разработан макет монокуляра дополненной реальности на основе дифракционного световода из ФТР-стекла, исследованы его основные технические характеристики.

Объектом исследования является применение оптических свойств ФТР-стекла для дифракционных световодов оптических устройств дополненной реальности.

Предметом исследования является метод углового мультиплексирования для записи 3D-ДР и формирования световодных ДОО в ФТР-стекле, а также экспериментальный макет дисплея дополненной реальности, реализованный на базе полученных дифракционных световодов.

Методы исследования

Результаты исследований получены путём численного анализа, математического моделирования и физического эксперимента. При моделировании дифракции на 3D-ДР использовалась теория связанных волн. В качестве технологии нанопроизводства рассчитанных световодных ДОО использован метод углового мультиплексирования при записи интерференционного поля в объемной регистрирующей среде с применением фазовых масок.

Научная новизна

1. Для оптических устройств дополненной реальности с широким угловым полем зрения впервые предложен дифракционный световод из ФТР-стекла, у которого ДОО находятся не на поверхности, а внутри световода.

2. Впервые предложен метод углового мультиплексирования 3D-ДР для записи ДОО в ФТР-стекле с помощью фазовых масок, который позволяет увеличить угловое поле зрения более чем в 10 раз по сравнению с обеспечиваемым единичной 3D-ДР полем, которое составляет менее 3° .

3. Разработана оригинальная математическая модель дифракции излучения на мультиплексированных 3D-ДР, которая учитывает условия записи и функционирования 3D-ДР в составе дифракционного световода и позволяет определить оптимальный угловой шаг мультиплексирования с учетом угловой селективности и спектра источника излучения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод углового мультиплексирования в предложенном сочетании с фазовыми масками для получения дифракционных световодов из ФТР-стекла, позволяет создать оптические устройства дополненной реальности с угловой разрешающей способностью не менее $3,0 \pm 0,5$ угл. мин., перепадом яркости в изображении не более 20% и с угловым полем зрения более 30° .

2. Разработанная оригинальная математическая модель позволяет синтезировать ДОЭ на базе 3D-ДР и определить оптимальные условия углового мультиплексирования для создания дифракционных световодов.

3. Предложенный интерференционный метод записи дифракционных световодов с ДОЭ посредством углового мультиплексирования 3D-ДР с помощью фазовой маски, позволяет стабилизировать интерференционную картину по сравнению с традиционными двухлучевыми методами записи, обеспечивая допуск на амплитуду внешних вибраций в 5 раз больший, что упрощает технологию записи.

Практическая значимость

1. Разработан стабильный метод записи субмикронных 3D-ДР на основе углового мультиплексирования. Этот метод дополняет существующие методы интерференционной записи и может использоваться для нанопроизводства световодных трехмерных ДОЭ и фотонных кристаллов.

2. Предложенные методы компьютерного моделирования могут использоваться для синтеза трехмерных ДОЭ, состоящих из 3D-ДР, и дополняют существующие методы синтеза дифракционных структур.

3. Реализован макет монокуляра дополненной реальности, в оптической системе которого используется монолитный дифракционный световод из ФТР-стекла с ДОЭ на основе 3D-ДР, обеспечивающий угловое поле зрения до 34° .

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач и использованных приближений, применением апробированных методов компьютерного моделирования, а также согласованностью результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований.

Реализация и внедрение результатов исследования

Результаты диссертационной работы внедрены и применены на предприятии голографической промышленности АО «НПО «Криптен» при выполнении НИР «Голопамять-1,2» для расчета дифракционной эффективности и спектрально-угловой селективности микроголограмм получаемых на фотополимерных материалах, что подтверждается соответствующим актом внедрения.

Основные результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им.

Н. Э. Баумана для актуализации лекций и домашних заданий в рамках дисциплины «Прикладная голография» по направлениям подготовки магистров 12.04.02 «Опtotехника», 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии».

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 7 научно-технических конференциях: XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, Россия, 2023), XIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, Россия, 2024), XII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» ФПО-2020 (онлайн, ИТМО, Санкт-Петербург, 2020); XVII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO 2020 (Москва, 2020); X Международная конференция по фотонике и информационной оптике (онлайн, МИФИ, Москва, 2020); два доклада на конференции SPIE Photonics Europe 2020 (Online Only, 2020); SPIE Optics + Optoelectronics 2021 (Чехия, Прага, 2021).

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 15 научных работах, в том числе 7 статей [1–7] опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и/или международные базы цитирования Web of Science и Scopus, 4 тезисов докладов [8–11] — в сборниках, входящих в базу Scopus, и 4 тезисов докладов [12–15] — в иных изданиях.

Личный вклад автора заключается в создании оригинальной математической модели, проведении экспериментов по записи и контролю трехмерных дифракционных решеток в рамках диссертационной работы. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Во всех работах, выполненных в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, разработке методов их решения, получении, обработке и анализе результатов исследований. Все экспериментальные результаты, вошедшие в диссертационную работу, получены совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 149 страниц, включая 73 Рисунка и 5 таблиц. Библиография содержит 127 наименований на 14 страницах, без учета публикаций автора — 109 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы. Представлена структура диссертации с краткой характеристикой работы по главам.

В первой главе на основе проведенного анализа оптических схем устройств дополненной реальности выработаны принципы проектирования дифракционных световодов из ФТР-стекла. Задача разработки оптических устройств дополненной реальности независимо от технического исполнения

заключается в соблюдении научно-обоснованного компромисса между размером поля зрения, коэффициентом передачи изображения и равномерностью яркости в пределах выходного зрачка, а также затратами на производство и размером устройства. Применение ФТР-стекла решает проблему многослойных световодов, что влечет уменьшение габаритов световода и улучшение условий эксплуатации.

Рисунок 1 иллюстрирует схему монохромного монокуляра дополненной реальности, основанного на дифракционном световоде из ФТР-стекла, где составные ДОЭ из мультиплексированных 3D-ДР используются в качестве компонентов ввода в световод и вывода из световода.

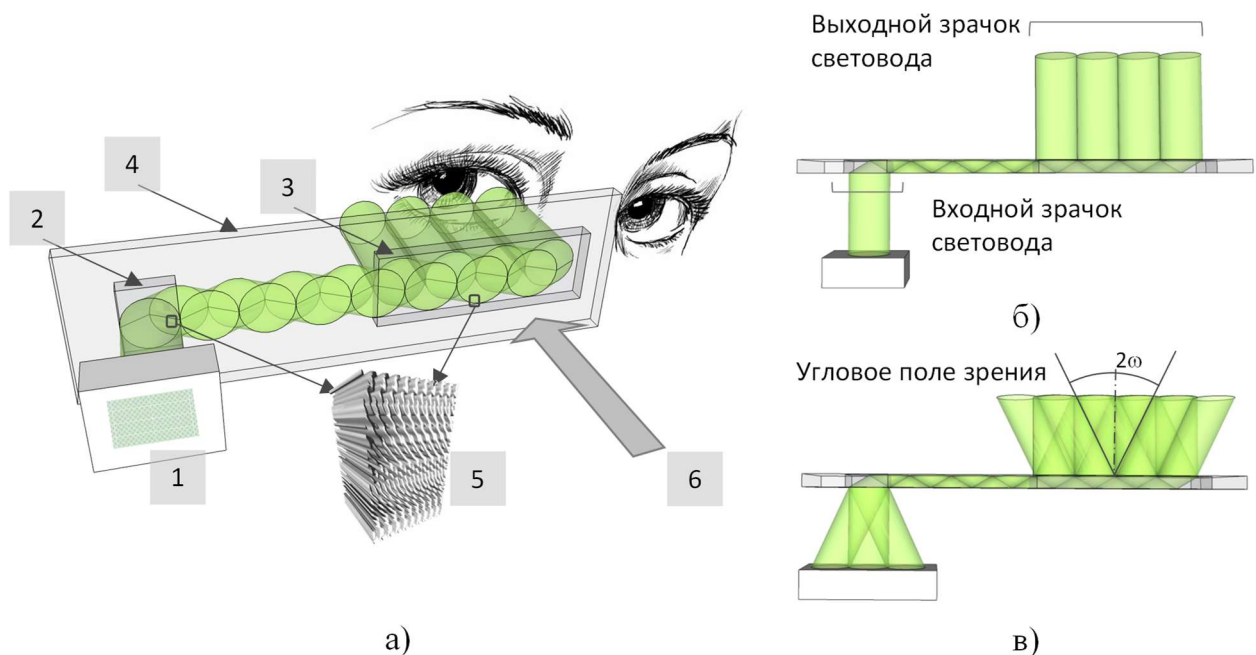


Рисунок 1. Схемы монокуляра дополненной реальности с мультиплексированными 3D-ДР: а) функциональная схема, где 1 — модуль генерации изображения, состоящий из микродисплея с системой подсвета и коллимирующего объектива, 2 — входной ДОЭ, 3 — выходной ДОЭ, 4 — световод из ФТР-стекла в виде плоскопараллельной пластины, 5 — модель фазовой микроструктуры из мультиплексированных 3D-ДР, которые записаны по всей толщине световода, 6 — направление формирования изображения сцены реального мира; б) схема распространения луча, соответствующего центральному углу поля зрения, в) схема распространения пучков лучей, соответствующих центральному и крайним углам поля зрения.

Входной и выходной ДОЭ имеют идентичную геометрию модуляции показателя преломления, как показано на Рисунке 1,а, и записываются одновременно при последовательном угловом мультиплексировании 3D-ДР. На основе анализа существующих методов записи световодных ДОЭ предложен оригинальный метод записи с помощью фазовых масок с учетом углового мультиплексирования 3D-ДР.

Рисунок 2а иллюстрирует схему записи. На Рисунках 2,б и 2,в представлены области формирования интерференционной картины с помощью

селективной и неселективной фазовых масок соответственно. Неселективная фазовая маска представляет собой рельефно-фазовую двумерную дифракционную решетку, нанесенную на подложку, которая является световодом. Дифракция регистрирующего УФ-излучения на ней приводит к появлению трех дифрагированных пучков, как показано на Рисунке 2,б. Поэтому в подложке формируются три области с различной геометрией интерференционных полос: 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 (≤ 2 мм) по сравнению с апертурой записывающего пучка (40 мм). Рабочее направление периодичности рассчитанных 3D-ДР формируется при интерференции 0-го и –1-го порядка дифракции и присутствует в областях II и III (Рисунок 2,б).

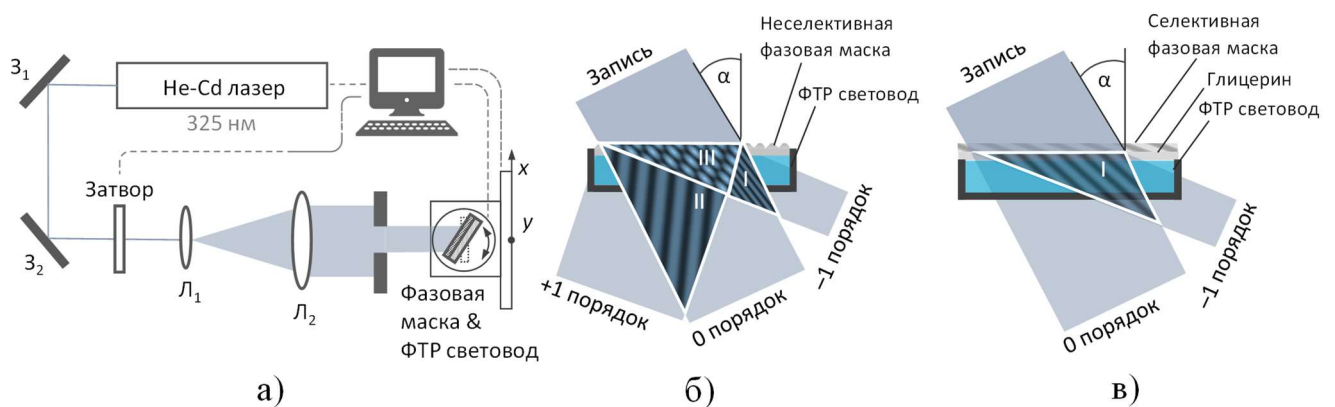


Рисунок 2. Схема записи ДОЭ с использованием углового мультиплексирования с помощью фазовой маски (а). Область записи, сформированная при однократной экспозиции неселективной фазовой маски (б) и селективной фазовой маски (в).

Селективная фазовая маска, показанная на Рисунке 2,в, представляет собой фазовую 3D-ДР, и должна стыковаться к световоду через иммерсионную жидкость. Дифракция УФ-излучения на ней приводит к формированию двух пучков: проходящего (0-й порядок) и дифрагированного (–1-й порядок). В этом случае для каждого шага мультиплексирования требуется отдельная фазовая маска, рассчитанная под конкретный угол записи. Поэтому исследования в диссертационной работе должны быть направлены как на разработку и модификацию методов расчета световодного ДОЭ с учетом составного углового поля зрения, так и на поиск оптимальных путей формирования ДОЭ, состоящего из мультиплексированных 3D-ДР.

Во второй главе представлена оригинальная математическая модель преобразования излучения посредством мультиплексированных 3D-ДР. Она позволяет синтезировать составные ДОЭ для дифракционных световодов при оптимальных условиях углового мультиплексирования с учетом угловой селективности 3D-ДР и спектрального состава источника излучения в модуле генерации изображения. Рисунки 3,а и 3,б иллюстрирует рабочую геометрию

пары дифракционных решеток в составе входного ДООЭ1 и выходного ДООЭ2, отвечающих за узкий участок из общего углового поля зрения. Наряду с функцией вывода изображения, ДООЭ2 расширяет выходной зрачок по горизонтали.

Полосы 3D-ДР (поверхности с одинаковой модуляцией показателя преломления) наклонены под углом γ относительно подложки и действуют как микрозеркала. Падающий пучок должен локально удовлетворять условию Брэгга для каждой мультиплексированной 3D-ДР. В исследуемом случае, как следует из геометрии распространения, все решетки пропускающие. В свою очередь, каждая мультиплексированная 3D-ДР определяется направлением полос интерференционной картины, образованной после дифракции регистрирующего пучка на фазовой маске, как показано на Рисунке 3, в.

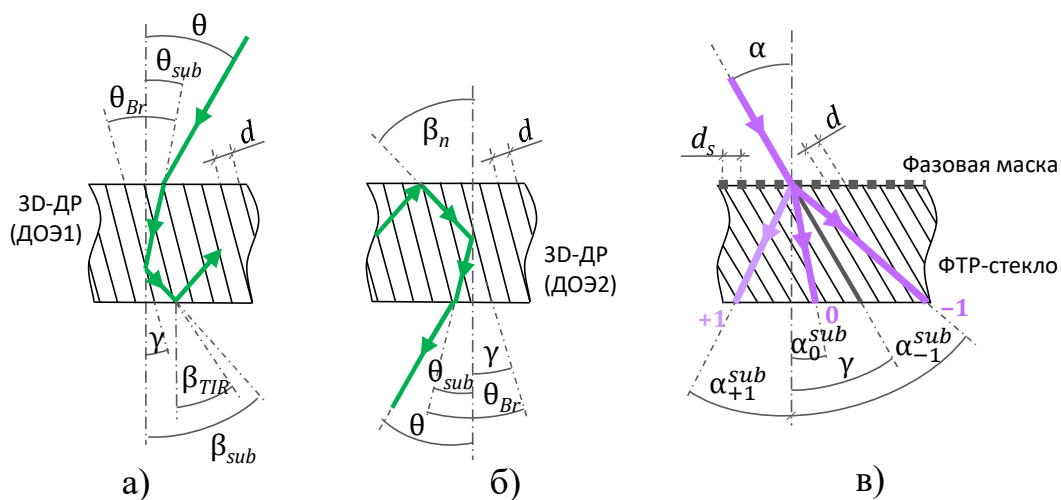


Рисунок 3. Геометрия дифракции излучения на одной 3D-ДР: а) в составе входного мультиплексного ДООЭ1 и б) в составе выходного мультиплексного ДООЭ2. в) Схема записи одной 3D-ДР для одного шага мультиплексирования с помощью неселективной фазовой маски. Параметры: θ , θ_{sub} — углы падения в воздухе и в световоде относительно нормали к поверхности, соответственно; θ_{Br} — угол Брэгга; γ — угол наклона интерференционных полос; β_{sub} — угол дифракции в световоде относительно нормали к поверхности подложки и угол распространения одновременно; α_1 — угол записи относительно нормали к поверхности подложки; α_{-1}^{sub} , α_0^{sub} — углы записи в световоде относительно нормали, соответствующие -1-му и 0-му порядкам дифракции, α_{+1}^{sub} — угол дифракции +1-ого порядка.

Одиночный когерентный лазерный пучок освещает фазовую маску и формирует наложенные пучки в дифракционных порядках, таким образом фазовая маска копируется в толстослойный голографический материал — в подложку из ФТР-стекла. Эта процедура также называется голографическим или оптическим копированием.

Рассмотрим подробно запись с помощью неселективной фазовой маски, период которой d_s рассчитывается с учетом ограничений, накладываемых на участвующих в копировании пучки.

На максимальное значение угла записи α для любой мультиплексной решетки, записанной на любом шаге, накладывается ограничение $\alpha_{\max} \leq 45^\circ$, связанное с технологичностью наклонного освещения фазовой маски. С другой стороны, в среде должен существовать достаточный угол дифракции, который составляет $\alpha_{-1}^{sub} \leq 75^\circ$ в связи с условиями распространения и взаимодействия излучения с решетками внутри подложки. Период фазовой маски, обеспечивающий эти условия, определяется уравнением решетки

$$d_s = -\lambda_{rec} / (n \cdot \sin(\alpha_{-1 \max}^{sub}) - \sin \alpha_{\max}) \quad (1)$$

где λ_{rec} — длина волны записи, n — показатель преломления.

Затем вычисляются углы Брэгга θ_{Br} и угол наклона γ , учитывая, что геометрия распространения удовлетворяет условию Брэгга для участков входного поля зрения, как показано на Рисунке 3,а. Параметры брэгговской решетки

$$\begin{cases} \theta_{Br} = \sin^{-1}(\lambda / (2dn)), \\ \gamma = \theta_{Br} - \theta_{sub}, \\ d = d_s \cos \gamma, \end{cases}$$

где λ — длина волны, d — период 3D-ДР, γ — угол наклона полос 3D-ДР.

Затем рассчитывается соответствующая геометрия записи (угол падения α_1) для длины волны записи $\lambda_{rec} = 0,325$ мкм. Чтобы найти α_{-1}^{sub} , α_0^{sub} , как показано на Рисунке 2,б, решена система из двух уравнений, где одно является уравнением решетки для фазовой маски, а другое определяет угол наклона как биссектрису между интерферирующими пучками (направлениями распространения 0-го и -1-го порядков дифракции)

$$\begin{cases} -\lambda_{rec} = d_s n (\sin \alpha_{-1}^{sub} - \sin \alpha_0^{sub}), \\ \gamma = 0,5 (\sin \alpha_{-1}^{sub} + \sin \alpha_0^{sub}). \end{cases}$$

Требуемое значение угла записи α записывающего пучка любого шага мультиплексирования составляет

$$\alpha = \sin^{-1} \left(n \cos \left(\gamma - \sin^{-1} \left(\frac{-\lambda_{rec}}{2d_s n \cos} \right) \right) \right).$$

Шаг мультиплексирования, то есть шаг $\Delta\alpha$ по углу записывающего пучка, выбирается из условия допустимой неравномерности изображения при формировании составного углового поля зрения соседними 3D-ДР и обеспечиваемыми спектрально-угловыми характеристиками 3D-ДР.

Исследуемые 3D-ДР представляют собой толстослойные голограммные дифракционные решетки с синусоидальной модуляцией фазового профиля при дифракции в режиме Брэгга, поэтому теория связанных волн Когельника корректнее всего подходит для решения задачи дифракции излучения. Для пропускающих 3D-ДР, которые исследуются в работе, угловой коэффициент $c_s > 0$, граничные условия $R(z=0) = 1$, $S(z=0) = 0$. Общая формула для вычисления комплексной амплитуды волны S , дифрагированной на пропускающей 3D-ДР для $z = T$ имеет вид

$$S = -j\sqrt{c_R/c_S} \exp\left(-\frac{\alpha T}{c_R} + \xi\right) \sin \sqrt{(v^2 - \xi^2)/\sqrt{1 - \xi^2/v^2}},$$

$$v = \frac{\kappa T}{\sqrt{c_R c_S}}, \quad \xi = \frac{T}{2} \left(\frac{\alpha}{c_R} - \frac{\alpha}{c_S} - \frac{j\vartheta}{c_S} \right),$$

где κ — это константа взаимодействия, ϑ — коэффициент расфазировки, c_R и c_S — угловые коэффициенты, α — коэффициент поглощения, информация о периоде содержится в коэффициентах ϑ и c_S , T — толщина слоя фоточувствительной среды, равная толщине световода. Параметры v и ξ , в общем случае, являются комплексными числами.

Дифракционная эффективность определяется в соответствии с формулой

$$\eta = \frac{|c_S|}{c_R} S \cdot S^*,$$

где S^* — комплексно-сопряженная амплитуда дифрагированной волны.

Зависимость дифракционной эффективности от угла падения излучения и длины волны для мультиплексного ДОЭ в рассматриваемом случае является передаточной функцией ДОЭ, как показано на Рисунке 4.

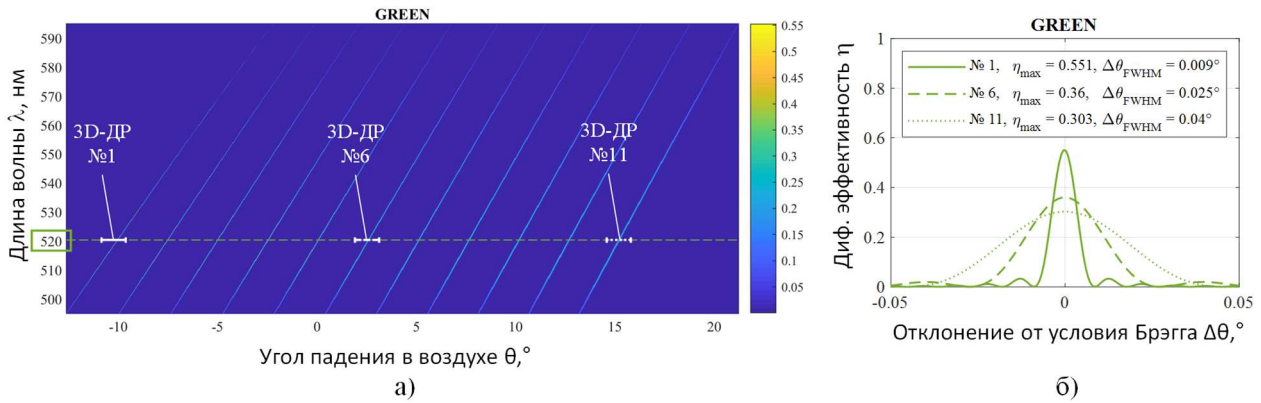


Рисунок 4. Передаточная функция ДОЭ: (а) спектрально-угловая диаграмма ДОЭ, состоящего из 11 мультиплексных 3D-ДР, каждая полоса на диаграмме соответствует условию Брэгга для отдельной 3D-ДР; (б) контуры угловой селективности для спектрального максимума (520 нм) для крайних (№6 и №11) и медианной (№1) мультиплексных 3D-ДР.

Спектрально-угловая диаграмма (Рисунок 4,а) показывает, как с помощью ДОЭ передаются различные углы в широком спектральном диапазоне. Каждая отдельная 3D-ДР в составе ДОЭ будет преобразовывать выделенный участок углового поля в узкой полосе, ограниченной селективностью. На диаграмме (Рисунок 4,а) передаточная функция отдельной дифракционной решетки показана светлой полосой, цвет полосы соответствует величине дифракционной эффективности, разные преобразованные участки поля зрения будут формировать изображения для разных участков спектра. Таким образом, для каждой монохроматической линии поле будет передаваться практически в

дискретном наборе углов, и чем шире спектральная полоса падающего излучения, тем шире общая угловая ширина полосы.

Рисунок 4,б иллюстрирует уширение контура селективности при изменении угла записи, то есть при изменении параметров мультиплексированных 3D-ДР. Именно ширина полосы, обеспечиваемая контурами селективности для конкретной длины волны, определяют границу углового разрешения для формируемого изображения, а также устанавливают требования к клиновидности световода. Наблюдается компенсация количества отражений в подложке посредством угловой селективности 3D-ДР: для лучей, распространяющихся в подложке под меньшими углами, то есть обладающих большим количеством отражений, полоса $\Delta\theta_{FWHM}$ шире.

На Рисунке 5 представлен анализ дифракции для RGB (Red, Green, Blue) излучения проектора Mini Ray, который применяется в качестве модуля формирования изображения. Дифракционная эффективность для зеленого спектрального максимума составляет 35–55%. Общая передаточная функция по углу поля зрения фактически представляет собой сшивку контуров селективности от каждой мультиплексированной 3D-ДР для широкого участка спектра. Разность амплитуды пересекаемых контуров соответствует неравномерности яркости в итоговом изображении.

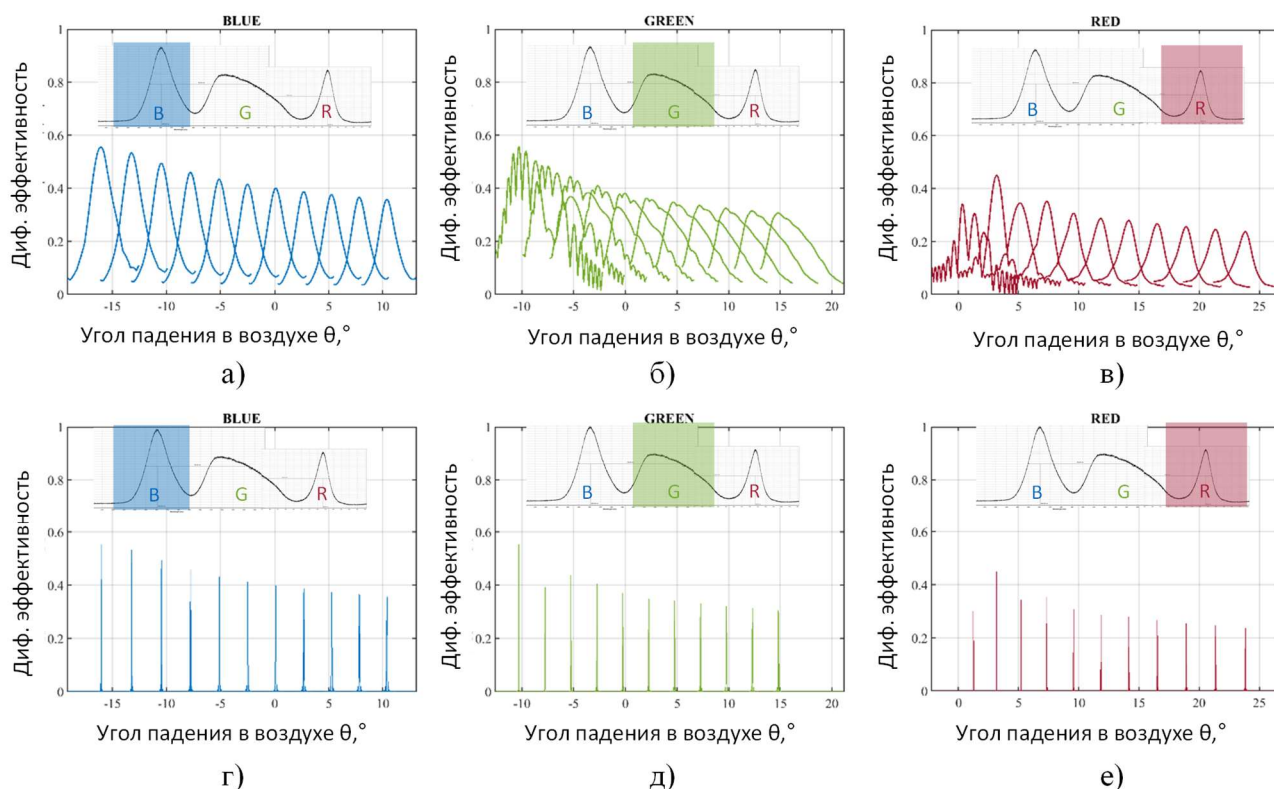


Рисунок 5. Контур угловой селективности для широких синего, зеленого и красного спектральных диапазонов (а–в), для спектральных максимумов 460 нм, 520 нм и 627 нм (г–д)

Предложенная математическая модель решает задачу проектирования оптических спектральных или угловых соединителей, реализованных с помощью голограммных 3D-ДР.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования по созданию дифракционного световода из ФТР-стекла на базе мультиплексированных 3D-ДР для оптических устройств дополненной реальности. Исследования по мультиплексированию проводились с позиции сравнения двух типов фазовых масок: селективных и неселективных дифракционных решеток, как показано на Рисунке 2. Стенд записи и мультиплексирования является виброустойчивым, так как по сравнению с традиционными двухлучевыми методами записи в предложенном методе интерференционная картина стабилизирована при внешних вибрациях с амплитудой, существенно превышающей период 3D-ДР (в ~ 5 раз). Измерения относительных перемещений проводились с использованием микроинтерферометра Numerical Vision Displacement Meter и лазера Cobolt Flamenco DPSS (660 нм, 100 мВт) в течение 1,25 часа. Угловое мультиплексирование проводилось в широком сколлимированном пучке с $\varnothing 45$ мм посредством непрерывного лазера He-Cd-лазер Kimmon IK3501R-G мощностью 50 мВт и длиной волны 325 нм.

При записи образец ФТР-пластины, совмещенный с фазовой маской, устанавливался на угловом и линейных позиционерах для юстировки положения относительно регистрирующего пучка. В случае применения неселективной фазовой маски, этапы подготовки включали нанесение фоторезиста на поверхность световода из ФТР-стекла, запись по расчетным параметрам и проявление фазовой маски, почернение задней поверхности и граней пластины. После записи всех мультиплексированных 3D-ДР в ФТР-стекле фоторезистивная фазовая маска удалялась с поверхности световода. Постэкспозиционная обработка для ФТР-стекла заключалась в высокотемпературной обработке в печи в течение 10 часов при температуре $\approx 500^\circ\text{C}$. В представленных экспериментах использовалась электрическая муфельная печь SNOL 7,2 / 1100L с керамической камерой. Завершающим этапом было обесцвечивание области с записанным ДОО путем прямого сканирования с использованием импульсного фемтосекундного мощного излучения зеленого лазера ($\lambda = 515$ нм), что необходимо для повышения прозрачности изготавливаемого световода.

Измерения дифракционной эффективности проводились с помощью зеленого лазера MSL-FN-532 (200 мВт), измерителя мощности Ophir Photonics PD300 и поворотного позиционера Standa 8MR191 с разрешением 4,5 угл. сек. Показано, что для обоих типов фазовых масок рационально использовать дозы излучения 1–2 Дж/см². Запись мультиплексных 3D-ДР проводилась для исследования влияния количества шагов мультиплексирования и влияния времени экспонирования на распределение дифракционной эффективности.

На Рисунке 6 показаны результаты эксперимента по увеличению количества шагов мультиплексирования при сохранении времени экспонирования (2 мин.) для записи каждой элементарной дифракционной решетки, что допустимо в силу продолжительно линейного участка

чувствительности ФТР-стекла. В пределах экспонирования единичного элемента от 40 до 90 секунд, дифракционная эффективность полученных мультиплексных элементов варьируется незначительно. Дифракционная эффективность отдельной решетки в N -кратном мультиплексировании уменьшается примерно в \sqrt{N} раз. Значение угловой полосы селективности варьируется от $2,6'$ до $3,6'$ для различных 3D-ДР мультиплексов по уровню дифракционной эффективности 10%. Данная величина определяет минимальное угловое разрешение, передаваемое с помощью дифракционного световода.

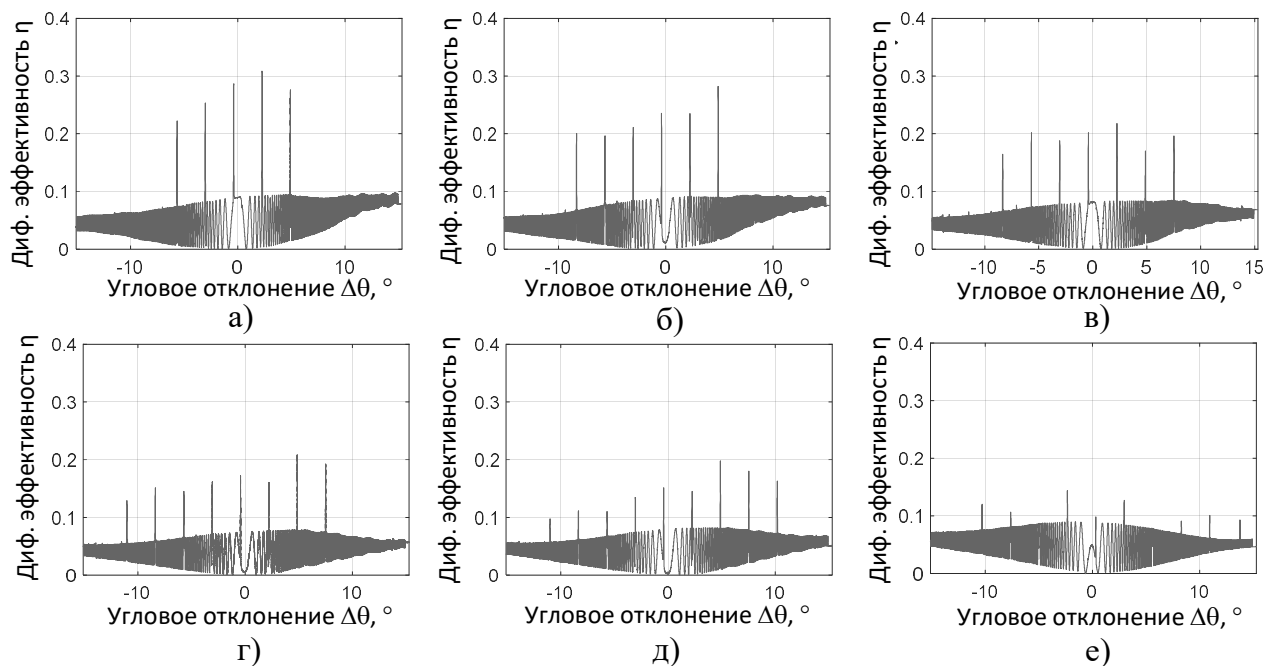


Рисунок 6. Угловые характеристики дифракционной эффективности для мультиплексных 3D-ДР, записанных с помощью неселективной фазовой маски 5-кратным (а), 6-кратным (б), 7-кратным (в), 8-кратным (г), 9-кратным (д) и 10-кратным мультиплексированием (е)

На Рисунке 7,а показан прототип монокуляра, основной которого является дифракционный световод из ФТР-стекла с мультиплексированными 3D-ДР размером $2 \times 40 \times 40$ мм с входным элементом 10×20 мм и выходным элементом 20×20 мм. Микродисплей в модуле генерации изображения 1 формирует изображение, вводимое в световод с помощью входного ДОЭ 2 (не видно на фотографии из-за корпуса). Конструкция монокуляра включает в себя коммерческий пико-проектор MiniRay (разрешение 640×360) в качестве модуля генерации изображения. В частности, этот проектор был выбран из-за того, что он имеет широкий зеленый участок спектра по сравнению с другими компактными версиями проекторов. Наблюдение выведенного изображения обеспечивается выходным ДОЭ 3. Расширение зрачка обеспечивалось только в горизонтальном направлении.

На Рисунке 7,б показано монохромное изображение «BMSTU» в условиях искусственного освещения. Продемонстрирована возможность формирования изображения с помощью дифракционного световода, функционально

показанного на Рисунке 1. Многоцветная знако-символьная информация передается таким образом, что разные цвета имеют свое собственное пространственное положение в горизонтальном поле зрения, как показано на Рисунке 7,в, что было спрогнозировано на этапе компьютерного моделирования (Рисунок 5).

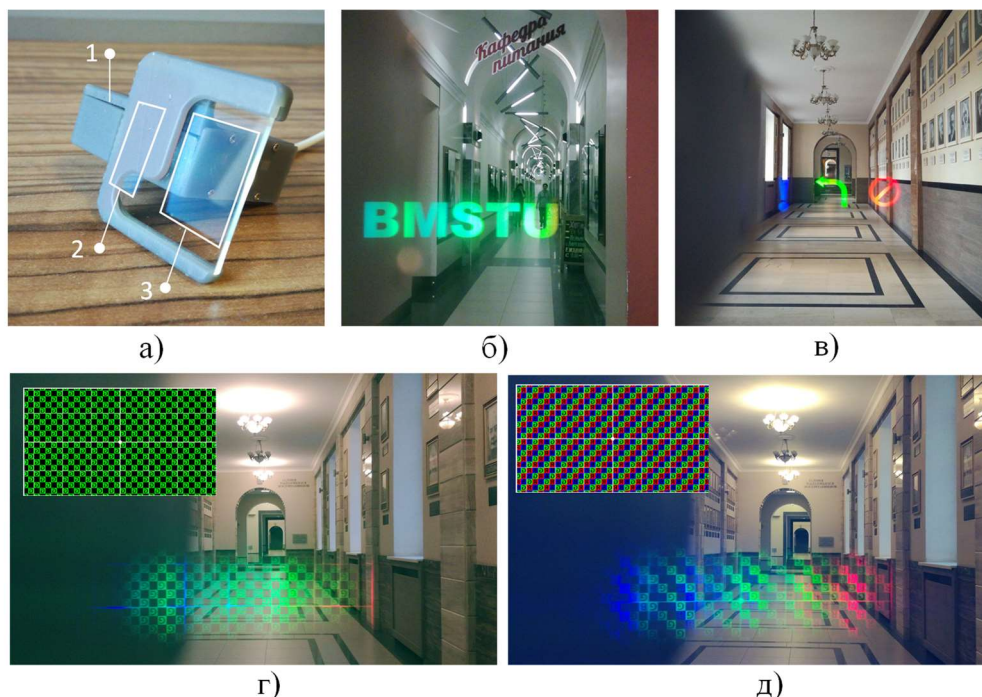


Рисунок 7. Фотография прототипа монокуляра (а): (1) — DLP проектор Mini Ray, (2) — вводной ДОО, (3) — выводной ДОО. Фотографии зеленого (б) и многоцветного (в) изображений в различных условиях внешней освещенности. Иллюстрация итогового поля зрения для монохромной (г) и многоцветной (д) технических таблиц

Рисунки 7,г и 7,д с помощью технических таблиц иллюстрирует неравномерность яркости изображения во всем поле зрения, составленного с помощью мультиплексированных 3D-ДР и соответствующее угловое поле зрения. Экспериментальные результаты согласуются с расчетными. В изображении заметна неравномерность яркости в горизонтальном направлении, она ограничена 20%. Для конкретного световода из ФТР-стекла толщиной 2 мм, удалось добиться поля зрения 23° для монохромной реализации и 34° для многоцветной реализации прозрачного монокуляра дополненной реальности при выходном зрачке более 15 мм при расположении глаза на расстоянии ~ 20 мм. Вертикальное поле зрения, наблюдаемое из одного положения глаза, составляет 10° . При этом размер входного зрачка оптической системы составлял $\varnothing 8$ мм, расширение выходного зрачка осуществлялось в горизонтальном направлении.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты исследований, преимущества предложенного метода, даны рекомендации по применению ФТР-стекла в качестве регистрирующей среды для реализации дифракционных световодов в дисплеях дополненной реальности, а также

описаны перспективы применения разработанного метода получения ДОЭ для других приложений интегральной фотоники.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследований был решен комплекс научных и инженерных задач, направленных на разработку дифракционного световода из ФТР-стекла для оптических устройств дополненной реальности. Получены следующие основные результаты:

1. Предложена методика расчета ДОЭ, состоящего из мультиплексных 3D-ДР для световодов, которая базируется на их селективных свойствах и согласуется с условиями записи с помощью фазовой маски.

2. Разработана оригинальная математическая модель дифракции излучения на мультиплексированных 3D-ДР, позволяющая рассчитать дифракционную эффективность для заданных условий преобразования углового поля излучения в световоде и определить оптимальный угловой шаг мультиплексирования с учетом угловой селективности и спектра источника излучения.

3. Разработан оригинальный двухступенчатый метод записи и углового мультиплексирования 3D-ДР для световода из ФТР-стекла: на первом этапе получают фазовую маску в фоторезисте, нанесенном на световодную пластину; на втором этапе посредством углового мультиплексирования в объеме световода формируется ДОЭ в виде серии 3D-ДР.

4. Получены экспозиционные характеристики для записи голографических 3D-ДР в ФТР-стекле через селективные и неселективные фазовые маски, вне зависимости от типа фазовой маски при записи элементарной 3D-ДР величина экспозиции составляет 0,5–2 Дж/см².

5. Экспериментально доказана эффективность применения неселективной фазовой маски в виде рельефно-фазовой дифракционной решетки для углового мультиплексирования, оптимизированы параметры записи для получения 3D-ДР, используемых для совмещения световых потоков, распространяющихся внутри световода с помощью ПВО.

6. Разработан макет эксплуатационно-стойкого монокуляра дополненной реальности на основе мультиплексных 3D-ДР в ФТР-стекле с угловым полем зрения выше 30°, повышенным коэффициентом передачи изображения и горизонтальным угловым разрешением не менее 3,0±0,5 угл. мин.

Публикации по результатам диссертационной работы

1. Augmented reality display based on photo-thermo-refractive glass planar waveguide / M. V. Shishova [et al.] // Optics Express. 2020. Vol. 28, is. 12. P. 17581–17594. DOI:10.1364/OE.395273. (1,5 п. л. / 1,0 п. л.)

2. Recording of the multiplexed bragg diffraction gratings for waveguides using phase mask / M. V. Shishova [et al.] // Photonics. Vol. 7, is. 4. P. 97. (0,92 п. л. / 0,4 п. л.)

3. Recording of multiplexed volume gratings via phasemask for augmented reality waveguides / M. V. Shishova [et al.] // Applied Optics. Vol. 60, № 4. P. A140–A144. (0,46 п. л. / 0,2 п. л.)

4. Исследование механизма записи мультиплексных трехмерных дифракционных решеток с планарным вводом-выводом оптического излучения в стеклянных световодах / С. Б. Одинокоев, М. В. Шишова [et al.] // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129, вып. 4 С. 427–435. (0,92 п. л. / 0,2 п. л.)
5. Selective Couplers Based on Multiplexed Volume Holographic Gratings for Waveguide Displays / M. V. Shishova [et al.] // Photonics. Vol. 8, is. 7. P. 232. (1,39 п. л. / 0,5 п. л.)
6. Image quality for near-eye display based on holographic waveguides / M. V. Shishova [et al.] // Applied Sciences. 2022. V. 12, №. 21. P. 11136. (1,62 п. л. / 0,35 п. л.)
7. Large area structural color printing based on dot-matrix laser interference patterning / M. V. Shishova [et al.] // Optics Express. 2023. V. 31. №. 23. P. 38610–38624. (0,92 п. л. / 0,46 п. л.)
8. Optical replication of relief-phase gratings in volume medium / M. V. Shishova [et al.] // Photosensitive Materials and their Applications: Proc of SPIE. 2020. Vol. 11367. P. 113670T. DOI:10.1117/12.2555998. (0,81 п. л. / 0,2 п. л.)
9. Development and research of a waveguide for augmented reality systems with diffractive relief-phase gratings / M. V. Shishova [et al.] // Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications VI: Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11353. P. 113531W. (0,15 п. л. / 0,92 п. л.)
10. Method for measuring the spatial characteristics of high-resolution diffraction gratings / M. V. Shishova [et al.] // Holography, Diffractive Optics, and Applications VIII: SPIE Proceedings. 2018. Vol. 10818. Paper 108180J. (0,2 п. л. / 0,58 п. л.)
11. Lithographic diffraction grating with a period failure / M. V. Shishova [et al.] // Optical Micro- and Nanometrology VII: SPIE Conference Proceeding. 2018. Vol. 10678. P. 106780E. (0,5 п. л. / 1,73 п. л.)
12. Дисплей дополненной реальности на основе голограммных зеркал / М. В. Шишова [et al.] // XIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. С. 637–638. (0,1 п. л. / 0,12 п. л.)
13. Исследование параметров дифракционных решеток с различным профилем рельефа для устройств дополненной реальности / М. В. Шишова [et al.] // XII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 600–601. (0,03 п. л. / 0,12 п. л.)
14. Исследование модуляции показателя преломления брэгговских дифракционных решеток / М. В. Шишова [et al.] // HOLOEXPO 2020: XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. С. 111–116. (0,58 п. л. / 0,2 п. л.)
15. Дифракционная эффективность решеток с ошибками профиля рельефа / М. В. Шишова [et al.] // HOLOEXPO 2018: XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. С. 109–114. (0,58 п. л. / 0,4 п. л.)