

*На правах рукописи*

КОРОЛЬКОВ ВИКТОР ПАВЛОВИЧ

**ЛАЗЕРНЫЕ ЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ  
СИНТЕЗА РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

01.04.05 «Оптика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук



Новосибирск-2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении  
науки Институт автоматики и электрометрии  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИАЭ СО РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
**Борыняк Леонид Александрович**  
Профессор, заведующий кафедрой НГТУ  
доктор технических наук  
**Чесноков Владимир Владимирович**  
Профессор, научный руководитель лаборатории СГГА  
доктор технических наук  
**Тавров Александр Викторович**  
Заведующий лабораторией ИКИ РАН

Ведущая организация: НИИ радиоэлектроники и лазерной  
техники МГТУ имени Н.Э. Баумана

Защита диссертации состоится «29» мая 2014г. в 10 часов на заседании  
диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном  
бюджетном учреждении науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского  
отделения Российской академии наук по адресу:  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н.

Ильичев Л.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Во многих отраслях промышленности, особенно таких, как оптическое приборостроение [1,2,3,4], лазерная обработка материалов [5], оптическая связь [6], измерительная техника [7,8], светотехника [9,10], биомедицина [11], находят широкое применение фазовые дифракционные и микрооптические элементы, имеющие гладкий, кусочно-непрерывный или ступенчатый поверхностный рельеф с глубиной до нескольких микрометров. Базой для этих приложений стали теоретические труды российских оптиков [12,13,14,15,16,17], во многом предвосхитивших будущий взрывной рост интереса к дифракционным оптическим элементам (ДОЭ), компьютерно-синтезированным голограммам и микрооптическим элементам. Общность технологических задач и их решений, возникающих при синтезе дифракционных и микрооптических элементов с поверхностным многоуровневым микрорельефом, позволяет объединить их в общий класс рельефно-фазовых оптических элементов (РОЭ). В зависимости от выполняемого преобразования оптического излучения они могут рассчитываться на основе законов дифракции или рефракции, но на определенном этапе компьютерного синтеза все они подвергаются дискретизации и представляются как многоуровневые. Дальнейшее развитие оптической промышленности, оптоэлектронного и лазерного приборостроения в немалой степени связано с использованием таких многоуровневых РОЭ. Они часто являются ключевыми инновационными компонентами при конструировании новых приборов и систем, а для сверхмощных лазеров могут являться, по сути, расходным оптическим материалом, обеспечивающим достижение предельных параметров.

Развитие систем и технологий для синтеза РОЭ стимулируется в настоящее время не только научными приложениями, но и потребностями передовых отраслей промышленности. Большое внимание при этом уделяется повышению производительности и точности процессов синтеза, а также развитию новых методов контроля микрорельефа РОЭ, соответствующих их особенностям. Во многом новые технологии производства РОЭ базируются на методах и средствах микроэлектроники. Фотолитография с применением бинарных [18,19] и полутонных фотошаблонов (ПФ) [20] стала многообещающим направлением в развитии массового производства РОЭ. ПФ с переменным коэффициентом пропускания позволяют изготавливать РОЭ большого размера с помощью экономически эффективной контактной фотолитографии. Однако классические фотоэмульсионные материалы не пригодны для таких фотошаблонов в связи с усадкой после проявления и низкой механической прочностью. Поэтому актуальной является задача поиска механически прочных материалов, изменяющих коэффициент пропускания при нагреве лазерным излучением, и разработка технологий записи ПФ на них с помощью лазерных литографических систем.

Для синтеза РОЭ наиболее эффективным и гибким инструментом оказались лазерные литографические системы с круговым сканированием [21,22,23,24]. Круговые лазерные записывающие системы (КЛЗС) основаны на непрерывном вращении подложки с регистрирующим материалом, при пошаговом или непрерывном радиальном перемещении сфокусированного лазерного пучка. Однако в связи с несовершенством механических компонентов системы двухкоординатного сканирования КЛЗС, актуальной является задача разработки специальных процедур коррекции траектории сканирования записывающего пучка при отклонении ее от траектории, вдоль которой рассчитывается фазовая функция изготавливаемого элемента. Диаметр поля записи в современных КЛЗС превышает 250 мм. Изменение линейной скорости сканирования пучка в этом поле от 0,03 до  $10^4$  мм/с, существенно усложняет задачу формирования распределения экспозиции на фоточувствительных материалах в соответствии с расчётной фазовой функцией РОЭ. Поэтому разработка лазерных литографических систем с круговым сканированием сфокусированного излучения и методов управления его интенсивностью, обеспечивающих компенсацию изменения линейной скорости сканирования пучка, является актуальной задачей для синтеза многоуровневых РОЭ на фоточувствительных материалах и ПФ на термочувствительных материалах.

В лазерных литографических технологиях синтеза многоуровневых РОЭ существует проблема ограничения пространственного разрешения, обусловленная конечным диаметром сфокусированного записывающего пучка. Дальнейшее уменьшение диаметра приводит к возрастанию неровности рельефа, увеличению времени записи и связано со значительными техническими трудностями. Поэтому разработка методов оптимизации прямой лазерной записи (ПЛЗ) по фоторезисту с целью компенсации влияния сглаженных обратных скатов дифракционных зон, в том числе с использованием дополнительных технологических процессов, является весьма актуальной для повышения дифракционной эффективности РОЭ с кусочно-непрерывным рельефом. С задачей оптимизации напрямую связана задача разработки методов профилометрического контроля изготовленных элементов, которая также актуальна из-за существенного отличия многоуровневого микрорельефа РОЭ от бинарного микрорельефа интегральных схем и микромеханических компонент. Для задач контроля и оптимизации важно решить проблему предсказания дифракционной эффективности по измеренному рельефу.

Ускоренное внедрение в народное хозяйство современных лазерных литографических систем и технологий синтеза РОЭ является актуальным для повышения конкурентоспособности ряда направлений оптического приборостроения, производства лазерной техники и медицинской промышленности.

**Целью работы** является разработка прецизионных лазерных литографических систем с круговым сканированием аналогового и импульсно модулированного

сфокусированного лазерного пучка, а также методов синтеза на их основе многоуровневых РОЭ с повышенной энергетической эффективностью преобразования распределения интенсивности и/или формы волнового фронта оптического излучения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие основные задачи:**

- Разработать принципы построения лазерных литографических систем с круговым сканированием сфокусированного излучения и методы управления его интенсивностью для формирования РОЭ и ПФ на основе фото- и термочувствительных материалов в поле диаметром свыше 250 мм, обеспечивающие управление экспозицией по угловой координате с диапазоном модуляции не менее чем 1:100 и компенсацию изменения линейной скорости сканирования в диапазоне более чем 1:10<sup>5</sup>;

- разработать методы прецизионной коррекции траектории движения записывающего пучка по вращающейся заготовке в лазерных литографических системах с круговым сканированием;

- исследовать термочувствительные материалы с коэффициентом пропускания, изменяющимся под действием лазерного излучения, и разработать методы записи на них ПФ для синтеза РОЭ.

- разработать и исследовать методы синтеза РОЭ с оптимизацией параметров технологических процессов для увеличения энергетической эффективности преобразования распределения интенсивности и/или формы волнового фронта оптического излучения, в том числе для конкретных практических задач метрологии, офтальмологии и лазерной техники.

- разработать методы контроля РОЭ, учитывающие специфику их микрорельефа, и дающие характеристики, слабо зависящие от типа профилометра.

### **Научная новизна.**

1. Разработаны и экспериментально реализованы принципы построения лазерных литографических систем с круговым сканированием сфокусированного излучения от двух источников с различными длинами волн для синтеза РОЭ и ПФ на основе фото- и термочувствительных материалов в поле диаметром свыше 250 мм, обеспечивающие управление экспозицией по угловой координате с диапазоном модуляции не менее чем 1:100 и компенсацию изменения линейной скорости сканирования в диапазоне более чем 1:10<sup>5</sup> за счет многоступенчатой аналоговой и импульсной модуляции интенсивности пучков и ее пошаговым ослаблением.

2. Для увеличения точности лазерных литографических систем с круговым сканированием предложены и экспериментально реализованы:

- метод коррекции систематических погрешностей в круговой траектории движения лазерного пучка, основанный на измерении и анализе угловой зависимости радиусов

кольцевого трека на заготовке, после осесимметричного ее поворота на шпинделе к диаметрально противоположному положению относительно оси вращения;

- метод периодического измерения дрейфа центра вращения заготовки, основанный на формировании серии меток под слоем фоторезиста и последовательном измерении и анализе их положения в процессе записи элемента для периодической коррекции радиальной координаты записывающего пучка, позволивший синтезировать высокоэффективные ДОЭ с остаточной ошибкой до  $\lambda/20$  (СКО).

3. Впервые обнаружены и объяснены эффекты оконтуривания и зависимости коэффициента пропускания от градиента мощности сканирующего сфокусированного лазерного пучка при его воздействии на пленки a-Si и LDW-стекла. Разработаны и экспериментально исследованы лазерные литографические технологии изготовления ПФ с диапазоном изменения коэффициента пропускания от 0,5-2% до 10-20% на пленках a-Si толщиной 100-110 нм и от 5-10% до 60% на LDW-стеклах.

4. Предложен и исследован метод увеличения дифракционной эффективности многоуровневых РОЭ, основанный на приграничной оптимизации локального распределения экспозиции при формировании их рельефа на фоторезисте. Для прямой лазерной записи метод реализуется путем встраивания универсальной ступенчатой передаточной функции в расчетные данные для экспонирования вдоль границ дифракционных зон на участках с шириной, не превышающей удвоенный диаметр записывающего пучка, и оптимизацией от 2 до 6 параметров этой функции. Показано, что приграничная оптимизация для полутонковой растровой фотолитографии, использующая обобщенную функцию рассеяния точки для моделирования технологического процесса синтеза РОЭ и вариацию структуры фотошаблона для локального перераспределения экспозиции, позволяет увеличить дифракционную эффективность до 20% для периодов дифракционных зон до 6 мкм.

5. Исследован метод синтеза РОЭ, основанный на использовании устойчивой к ионному травлению поверхностной контурной маски, сформированной под пленкой фоторезиста вдоль границ дифракционных зон, с линиями, ширина которых увеличивается с ростом периода дифракционных зон от 0,9 до 1,8 диаметра записывающего пучка для получения максимальной дифракционной эффективности в первом порядке. По результатам численного моделирования определены допустимые погрешности совмещения маски с границами зон и глубины ионного травления через нее. Показано, что увеличение дифракционной эффективности РОЭ может достигать 18-28% по сравнению с известными методами оптимизации микрорельефа.

6. Предложен, исследован и апробирован практически не зависящий от типа профилометра метод контроля многоуровневого микрорельефа РОЭ по аппроксимированной глубине, которая определяется путем экстраполяции до

границ дифракционных зон функции, аппроксимирующей форму зон между их обратными скатами, и вычислением перепада экстраполированного профиля на границе двух соседних зон или между границами одной зоны.

7. На основе лазерных литографических технологий разработаны и реализованы методы синтеза:

- кварцевых дифракционных матриц для серийного тиражирования бифокальных интраокулярных линз с микрорельефом, оптимизированным для минимизации биологических отложений и получения одинаковой дифракционной эффективности в нулевом и первом порядках дифракции.

- конформальных корректоров для исправления искажений волнового фронта излучения мощных твердотельных лазеров, обеспечивающих остаточные статические искажения волнового фронта не более чем  $\lambda/10$  (СКО).

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием многократно апробированных теоретических моделей и экспериментальных методов, сравнением полученных результатов с экспериментальными результатами и результатами компьютерного моделирования других авторов, а также результатами и актами внедрения созданных систем и методов.

**Практическое значение диссертации.** Полученные результаты имеют значение для ряда направлений оптических технологий. Для оптического приборостроения разработаны новые схемные решения лазерных литографических систем с круговым сканированием, обеспечивающие синтез многоуровневых РОЭ и ПФ на основе фото- и термочувствительных материалов в поле диаметром более 250мм. Разработаны методы синтеза на их основе многоуровневых РОЭ с повышенной энергетической эффективностью преобразования распределения интенсивности и/или формы волнового фронта оптического излучения, востребованных в различных отраслях промышленности. Для офтальмологии разработана и внедрена высокопроизводительная фотолитографическая технология изготовления дифракционных матриц для тиражирования бифокально-рефракционных интраокулярных линз. Для производства лазерной техники разработана технология изготовления конформальных статических внутрирезонаторных корректоров волнового фронта для твердотельных лазеров.

**Связь с государственными научно-техническими программами.** Работы по диссертации выполнялись по планам НИР ИАиЭ СО РАН по темам: "Разработка и исследование новых функциональных систем и элементов когерентной и нелинейной оптики" (гос. рег. N810839026, гос. рег. N80039444); "Разработка фундаментальных проблем создания и совершенствования элементной базы квантовой электроники и перспективной оптики" (гос. рег. N 01.86.0058729); "Развитие лазерных технологий и соответствующего оборудования субмикронной точности, разработка нетрадиционных элементов фотоники и высокопрецизионных

оптико-электронных измерительных систем для научных исследований и машиностроения" (гос. рег. N01.9.20000194); "Физико-технические основы 2-D и 3-D лазерных технологий (новые материалы и элементы для лазерных технологий, сверхразрешение, технологии оптической памяти, синтеза объемных моделей и изображений, микро- и наноструктурирование материалов). Развитие на их основе базовых лазерных технологий производства новых элементов, приборов и систем двойного назначения» (гос. рег. N01.9.60013066), «Оптические методы исследования и формирования твердотельных наноструктур с целью создания компонентов оптоэлектронных систем» (гос. рег. N 1201366866). Часть работ велась в рамках междисциплинарных и интеграционных проектов СО РАН N15 (2006-2008гг.), N 55 (2009-2011гг.), N 43 (2012-2014), N 92 (2012-2014), N3.2 (2006-2008),

**Внедрение результатов работы.** КЛЗС, их схемные решения и технологии лазерной записи РОЭ на них переданы по контрактам в КТИ НП СО РАН (г. Новосибирск), ОАО «НПП «Геофизика-Космос», ОАО "ПО "НПЗ", Институт технической оптики Университета Штутгарта (Германия), Самарский государственный аэрокосмический университет и другие организации. Разработанная технология синтеза кварцевых дифракционных матриц реализована в производстве дифракционно-рефракционных интраокулярных линз «МИОЛ-Аккорд» с оптимизированным микрорельефом. Линзы «МИОЛ-Аккорд», выпускаемые НПП «Репер-НН» (Нижний Новгород) совместно с ЗАО «ИНТРАОЛ», прошли успешные медицинские испытания в Новосибирском филиале ГУ МНТК «Микрохирургия глаза» и используются в медицинской практике.

#### **Методология и методы исследования.**

Теоретические методы основаны на скалярной теории дифракции, применении преобразования Фурье, методах статистического анализа, численных методах оптимизации, на моделировании формирования микрорельефа в фоторезисте на основе операции свертки с различными функциями, представляющими воздействие лазерного пучка и технологических процессов на фоторезист.

Экспериментальные методы основаны на методах оптической и электронной микроскопии, спектрофотометрических измерениях, фотоэлектрических методах измерений, спектроскопии комбинационного рассеяния света, на проведении экспериментов по записи тестовых РОЭ и измерении их микрорельефа и дифракционной эффективности, а также формируемого ими волнового фронта, для проверки численных и теоретических расчетов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Лазерные литографические системы на основе прецизионного кругового сканирования сфокусированного излучения с различными длинами волн и многоступенчатой импульсной и аналоговой модуляцией его интенсивности

обеспечивают синтез многоуровневых РОЭ и ПФ диаметром более 250 мм на фото- и термочувствительных материалах.

2. Прямая лазерная запись на пленках a-Si толщиной 100-110 нм и LDW-стеклах позволяет изготавливать полутонные фотошаблоны РОЭ с диапазоном изменения коэффициента пропускания от 0,5-2% до 10-22% для пленок a-Si и от 5-10% до 60% для LDW-стекла.

3. Дифракционная эффективность РОЭ, синтезируемых лазерной литографической технологией на фоторезисте, может быть увеличена за счет модификации микрорельефа вдоль границ дифракционных зон на участках с шириной, зависящей от периода зон, но не превышающей удвоенный диаметр записывающего пучка, путем приграничной оптимизации локального распределения экспозиции или путем формирования под пленкой фоторезиста на этих участках устойчивой к ионному травлению поверхностной контурной маски.

4. Контроль многоуровневого микрорельефа РОЭ, практически не зависящий от типа профилометра, возможен по аппроксимированной глубине, которая определяется путем экстраполяции до границ дифракционных зон функции, аппроксимирующей форму зон между их обратными скатами, и вычислением перепада экстраполированного профиля на границе двух соседних зон или между границами одной зоны.

5. Технология, сочетающая прямую запись фотошаблонов на лазерных литографических системах с круговым сканированием, полутонную фотолитографию и реактивное ионное травление, позволяет синтезировать:

- кварцевые дифракционные матрицы для серийного тиражирования бифокальных интраокулярных линз с микрорельефом, оптимизированным с целью минимизации биологических отложений и получения одинаковой дифракционной эффективности в нулевом и первом порядках дифракции.

- конформальные корректоры искажений волнового фронта излучения мощных твердотельных лазеров, обеспечивающие остаточные статические искажения волнового фронта не более чем  $\lambda/10$  (СКО).

**Апробация работы.** Основные материалы, представленные в диссертации, доложены на: Международной конференции Optics'88, Будапешт, Венгрия, 1988; Международной конференции Holography-89, Варна, Болгария, 1989; Международном Симпозиуме Photonics West'97, Сан Хосе, США, 1997; Международной конференции Diffractive Optics'97, Финляндия, 1997; Международном Симпозиуме Photonics West'99, Сан Хосе, США, 1999; Международной конференции Diffractive Optics'99, Йена, Германия, 1999; Международной конференции Diffractive Optics'2000, Квебек, Канада, 2000; 46-й Ежегодной встрече общества SPIE, Сан Диего, 2001; Седьмом Международном Симпозиуме Laser Metrology Applied to Science, Industry and Everyday Life,

Новосибирск, 2002; Тематической встрече OSA "DOMO-2002", Гуссон, США, 2002; VI Международной конференции "Прикладная оптика", Санкт-Петербург, 2004; Втором международном форуме Голография–экспо-2005, Москва; Тематической встрече EOS Diffractive Optics, Барселона, Испания, 2007; Международной конференции Lasers, Applications and Technologies 2007; Laser-assisted Micro- and Nanotechnologies, Минск, Беларусь; Международной конференции Optical Systems Design, Барселона, Испания, 2008; Международном симпозиуме Photonics Europe 2010, Брюссель, Бельгия; Международной конференции "Fundamentals of laser Assisted Micro-and Nanotechnologies" (FLAMN-10), Санкт Петербург, 2010; 7-ой Международной Конференции «ГОЛОЭКСПО – 2010» г. Москва, 2010; Международной конференции Practical Holography XXV: Materials and Applications, Сан-Франциско, США, 2011; XV Международной конференции "Laser Optics 2012", Санкт Петербург, 2012; Научно-технической конференции «СибОптика - 2013», Новосибирск, 2013; 3-ей Международной конференции EOS Manufacturing of Optical Components, Мюнхен, 2013.

**Публикации.** По результатам исследований, включенных в диссертацию, опубликовано 75 работ, в том числе: 34 статьи в рецензируемых изданиях, 1 глава в монографии, 2 статьи в сборниках научных статей, 3 патента и авторских свидетельства на изобретение, а также 35 статей в сборниках трудов конференций.

**Личный вклад.** Диссертация является обобщением исследований по развитию систем и технологий синтеза РОЭ, выполненных автором в ИАиЭ СО РАН с 1980-х годов по настоящее время. Личный вклад автора заключается в постановке, обосновании и решении задач, приведенных в диссертационной работе, непосредственном участии в разработке систем, технологий, алгоритмов, конструкторской и эксплуатационной документации, в синтезе и контроле оптических элементов, а также в выполнении и организации экспериментов и расчетов. Синтез РОЭ и ПФ выполнялся автором лично на КЛЗС нескольких поколений, созданных при его активном участии в ИАиЭ СО РАН и КТИ НП СО РАН. Экспериментальные образцы КЛЗС в ИАиЭ СО РАН создавались коллективом сотрудников лаборатории лазерных технологий под руководством В.П. Коронкевича и позднее лаборатории дифракционной оптики под руководством А.Г. Полещука при непосредственном участии автора. КЛЗС типа CLWS-300, создаваемые по контрактам, разрабатывались совместно с сотрудниками КТИ НП СО РАН под руководством В.П. Кирьянова и позднее А.Г. Верхогляда. Разработка и реализация новых принципов построения оптических каналов на этих системах выполнена под руководством автора. Автором сформулирована задача создания расчетного и базовые алгоритмы управляющего программного обеспечения, которое реализовано под его руководством Р.К. Насыровым, Р.В. Шиманским, В.В. Черкашиным и С.В. Остапенко. Синтез растрованных фотошаблонов выполнен

А.Р.Саметовым. Оптическая функция дифракционно-рефракционной интраокулярной линзы «МИОЛ-Аккорд» рассчитана Г.А. Ленковой и В.П. Коронкевичем при экспертной поддержке И.А.Исхакова, под руководством которого выполнена первичная апробация этих линз в НФ МНТК «Микрохирургия глаза».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, списка цитируемой литературы (223 наименования) и приложения с актами внедрения; изложена на 351 странице; включает 156 рисунков и 8 таблиц.

### **Содержание работы**

Во введении обсуждается актуальность темы, кратко описаны основные технологии изготовления многоуровневых РОЭ, проведен сравнительный анализ различных методов и систем сканирующей лазерной записи, сформулированы основные задачи работы, изложено краткое содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе кратко рассмотрены лазерные литографические системы с круговым сканированием, целенаправленно разрабатываемые в ИАиЭ СО РАН для задач синтеза РОЭ. Целевое проектирование выразалось не только в выборе наиболее подходящего для синтеза РОЭ способа сканирования, но и спецификациях узлов и программного обеспечения, вплоть до создания специального формата данных для описания РОЭ в полярных координатах. В результате созданы системы, обладающие технологической гибкостью, обеспечивающие более высокую точность формирования микроструктур оптического назначения по сравнению с системами, разработанными для задач микроэлектроники. В ИАиЭ СО РАН с начала 80-х годов при участии автора разработаны несколько поколений круговых лазерных записывающих систем (КЛЗС) для синтеза РОЭ и фотошаблонов в полярной системе координат. Они послужили прототипами для заказных версий, которые разрабатывались совместно с КТИ НП СО РАН. В первой главе кратко рассмотрены особенности конструкции и специфические технические параметры основных разновидностей созданных КЛЗС. Экспериментальные результаты, представленные в настоящей работе, получены на системе CLWS-300IAE, разработанной в ИАиЭ СО РАН, и различных версиях заказных систем, созданных совместными усилиями КТИ НП СО РАН и ИАиЭ СО РАН. Эти уникальные системы выпускаются под маркой CLWS-300 и не имеют аналогов, как в России, так и за рубежом. В настоящее время они работают в ряде научных и производственных организаций России, Европы и Китая.

Типичная КЛЗС состоит из основных узлов, показанных на функциональной блок-схеме на рисунке 1. Запись в такой системе ведется на подложке со светочувствительным покрытием, непрерывно вращаемой шпинделем на аэростатических опорах с постоянной скоростью, при пошаговом или непрерывном

перемещении фокусирующего микрообъектива по радиальной координате. Модуляция мощности пучка синхронизируется с вращением подложки и радиальным перемещением микрообъектива в соответствии с записываемой структурой РОЭ, которая представляется в виде последовательности векторов или пикселей с адресацией в полярной системе координат.

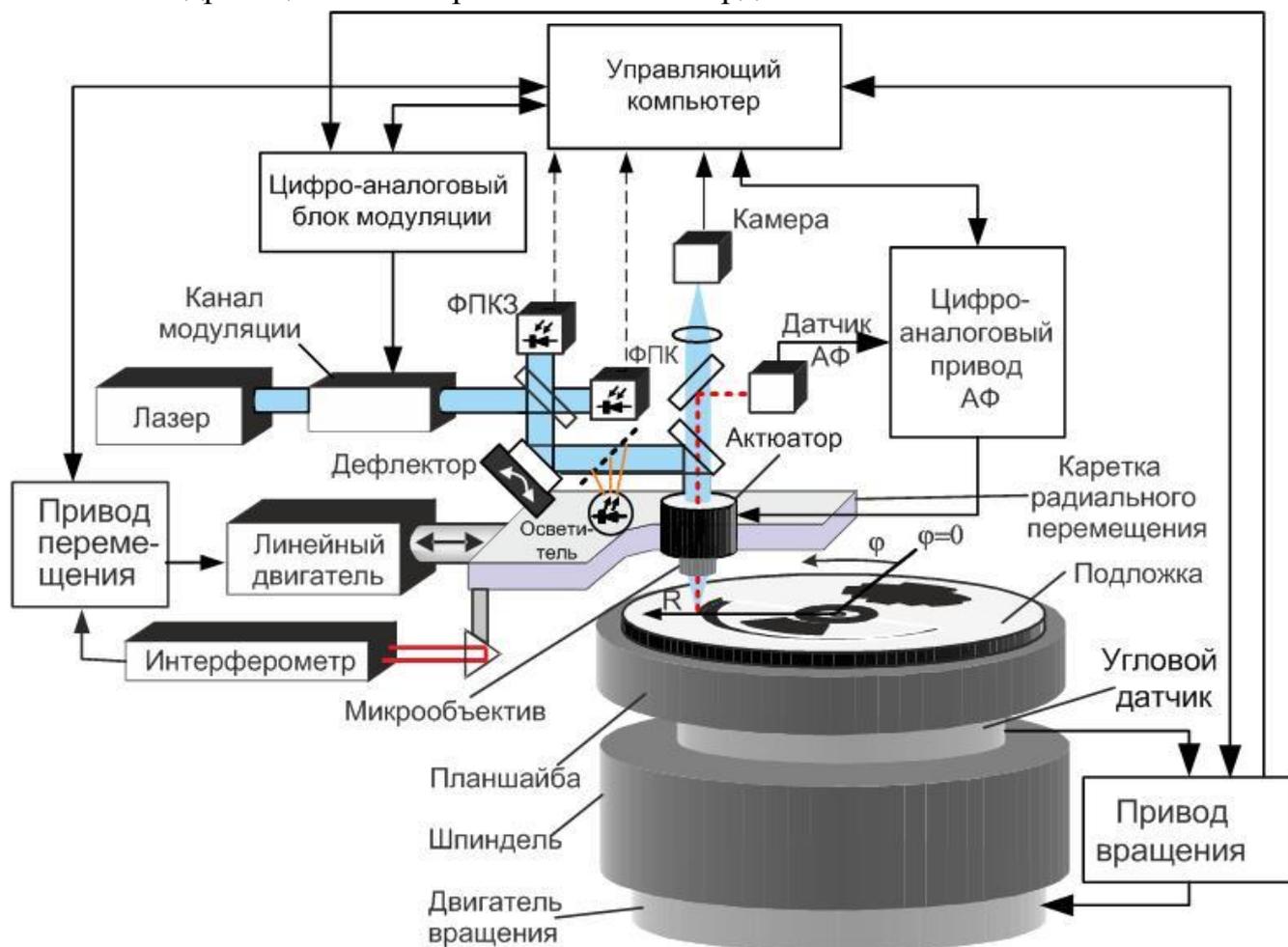


Рисунок 1.

Абсолютная погрешность координаты записывающего пучка в КЛЗС зависит от точности его перемещения относительно заготовки и от радиальных биений шпинделя, приводящих к отклонению траектории движения записывающего пучка по заготовке от идеальной круговой формы, используемой при расчете микроструктуры РОЭ. Типичная величина радиальных биений для шпинделей на аэростатических опорах лежит в диапазоне 0.05-0.2 мкм. Этот тип погрешности приводит не только к ошибке реальной радиальной координаты, но и к ошибке угловой координаты. Измерение отклонения траектории движения записывающего пучка от заданной формы дает возможность не только определить предел точности записывающего устройства, но и улучшить ее за счет коррекции.

Для оперативного измерения траектории пучка был разработан фотоэлектрический метод измерения диаметров кольца, записанного на регистрирующем материале вокруг центра вращения. Измерение производится по

сигналу фотоприемника контроля записи (ФПКЗ на рис. 1), пропорциональному отражению от регистрирующего материала. Проблема в том, что метод диаметров позволяет измерять только четные гармоники по отношению к частоте вращения шпинделя. Для получения полной информации о траектории пучка предложен новый метод, требующий проведения дополнительных операций. После записи кольца необходимо остановить шпиндель, повернуть заготовку на планшайбе на угол  $180^\circ$  и совместить центр кольца с центром вращения шпинделя. Затем необходимо снова привести шпиндель во вращение и измерить зависимость радиусов кольца от угловой координаты со стороны диаметрально противоположной положению лазерного пучка при записи. Математически доказано, что эта зависимость дает полную информацию о синхронных колебаниях оси вращения шпинделя без учета прецессии. На рисунке 2 показано экспериментально измеренное предлагаемым методом отклонение траектории пучка от круговой формы (а) и ее спектр (б). Показано, что остаточная радиальная ошибка совмещения приводит к появлению первой гармоники (на рисунке 2, б она равна около 105 нм), которая может быть удалена из зависимости с помощью Фурье анализа. Угловая ошибка совмещения после поворота подложки не должна превышать  $0,6^\circ$  для компенсации до 10 гармоник.

На основе предложенного метода измерения траектории пучка разработан метод расчета функции коррекции для управления электродинамическим дефлектором (рисунок 1), отклоняющим пучок вдоль оси радиального перемещения. Он позволил существенно уменьшить вклад биений шпинделя в ошибки записанных РОЭ. Запись тестовых дифракционных линз на CLWS-300 (ИТО, Штутгарт) с одинаковыми параметрами, но с включенным и с выключенным дефлектором, продемонстрировала уменьшение среднеквадратичного значения неосесимметричной ошибки формируемого волнового фронта в 4,2 раза.

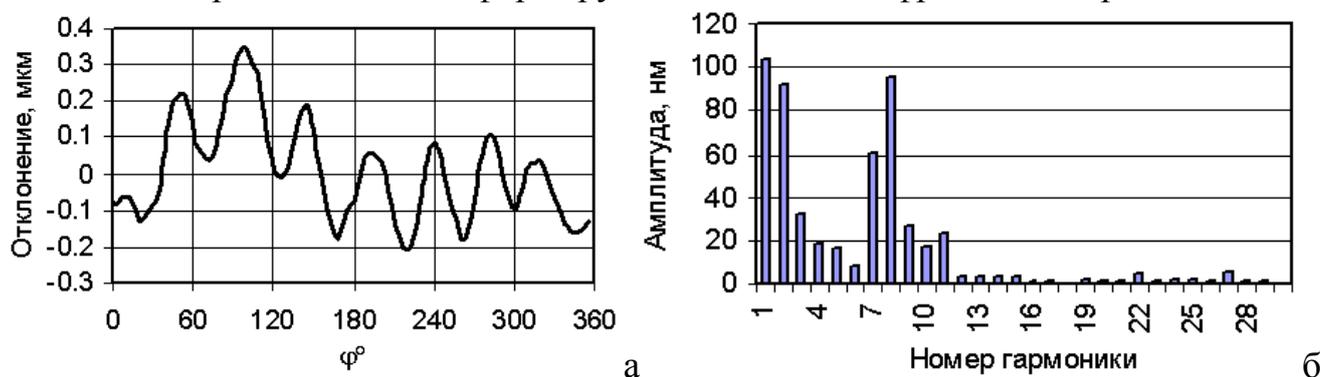


Рисунок 2.

Типичное время записи дифракционных элементов на КЛЗС лежит в пределах 2-8 часов в зависимости от диапазона изменения радиальной координаты в световом поле элемента. В течение этого времени взаимное расположение интерферометра и оси вращения шпинделя должно быть неизменным. Однако на практике

невозможно избежать механических дрейфов в системе из-за температурных градиентов. Поэтому необходимо следить за положением оси вращения заготовки в процессе записи и корректировать при необходимости начало координат системы радиального перемещения. В КЛЗС при термохимической записи фотошаблонов на пленках хрома для мониторинга положения оси вращения формируется кольцо путем испарения пленки лазерным пучком. Затем по сигналу ФПКЗ производится фотоэлектрическое измерение левого и правого радиусов кольца и вычисляется положение его центра. При использовании фоторезиста кольцо может быть сформировано проплавлением его поверхности. Но на чисто фазовой структуре при малом коэффициенте отражения зависимость зашумленного сигнала ФПКЗ от радиуса может принимать сложную форму, не всегда поддающуюся однозначной интерпретации. Для записи особо точных высокоэффективных ДОЭ предложено перед нанесением пленки фоторезиста на подложке, предварительно покрытой пленкой хрома, формировать термохимической лазерной технологией [25] кольцо вокруг центра вращения и линейку отражающих меток в форме коротких сегментов колец на разных радиусах микроструктуры ДОЭ. После нанесения центрального кольца и линейки меток на подложку наносится фоторезист и после сушки и предэкспозиции она устанавливается на планшайбу шпинделя. Непосредственно перед записью производится измерение положения всех меток. Во время записи РОЭ после экспонирования участка между каждыми двумя соседними метками измеряется положение метки на границе с необлученным участком. В случае смещения метки может производиться коррекция радиальной координаты на величину смещения. Таким образом, каждая метка измеряется записывающим пучком с уменьшенной мощностью только 2 раза, и паразитное увеличение дозы экспозиции будет незначительным. Для измерения метки требуется существенно меньшее время, чем для измерения центрального юстировочного кольца, так как не требуется переезд в центр подложки. Площадь меток ничтожно мала по сравнению с площадью ДОЭ, что исключает влияние искажения формы рельефа над ними на работу ДОЭ. Кроме этого, при расположении меток на границах дифракционных зон с высокой стороны они практически не окажут влияния на многоуровневый микрорельеф. После синтеза микрорельефа ДОЭ в фоторезисте и переноса его в подложку реактивным ионным травлением хромовые метки стравливаются.

Метод коррекции радиальной координаты с линейкой меток экспериментально апробирован при синтезе высокоэффективных ДОЭ на установке CLWS-300. В частности, для интерферометрических задач на подложке из плавленого кварца изготовлен прототип прецизионного дифракционного объектива с диаметром 80 мм и  $NA=0,158$  для  $\lambda=632,8$  нм. Остаточная ошибка волнового фронта составила  $\lambda/20$  (СКО) при однократном проходе. Метод периодической коррекции координат по линейке меток особенно важен для круговой лазерной

записи на поверхностях вращения, которая стала возможной на последних версиях КЛЗС, разработанных КТИ НП СО РАН и ИАиЭ СО РАН. Он позволяет избавиться от вертикального перемещения микрообъектива, требующегося при периодическом поиске центра по единственному кольцу в центре или на периферии заготовки.

С точки зрения повышения точности формирования формы микрорельефа РОЭ, большую роль играет канал модуляции мощности записывающего пучка. Разработано и реализовано несколько оригинальных систем модуляции и схемные решения оптико-электронной части КЛЗС. Необходимость этих разработок вызвана появлением новых регистрирующих материалов, развитием технологий синтеза и ростом востребованности многообразных типов РОЭ. Первоначально все системы основывались на применении одного акустооптического модулятора (АОМ). В дальнейшем задача записи многоуровневых РОЭ и ПФ с произвольной микроструктурой потребовала введения второго АОМ. Первый модулятор, охваченный оптико-электронной обратной связью, стабилизирует уровень мощности пучка, заданный для текущей радиальной координаты, а второй модулятор осуществляет скоростную многоуровневую модуляцию, синхронизированную с тактовыми импульсами угловой координаты. Такая схема модуляции была реализована на CLWS-300 с аргоновым лазером для исследования технологий записи ПФ на LDW-стекле и РОЭ на фоторезисте.

Развитие высокостабильных твердотельных и диодных лазеров, генерирующих излучение только на одной длине волны, сделало актуальной разработку лазерной записывающей системы, включающей два лазера: один – с длиной волны в УФ спектре для записи на фоторезисте, а второй более мощный с длиной волны 532 нм - для записи на термочувствительных средах таких, например, как пленки хрома и аморфного кремния, а также для записи юстировочных колец и меток путем плавления фоторезиста. Выбор длины волны 532 нм обусловлен высоким качеством и стабильностью их пучка, а также более низким коэффициентом поглощения в a-Si, чем для УФ излучения. Это снижает эффект обратной связи при записи ПФ. Система с двумя лазерами более полно реализует преимущества каждого из двух лазеров и дает возможность оперативно переходить с одной технологии записи на другую и даже сочетать их. Применение технологий записи на фото- и термочувствительных материалах на одной установке позволяет реализовать формирование серии хромовых меток под слоем фоторезиста для периодической коррекции радиальной координаты, а также запись контурной маски на хrome для реализации оптимизированного метода контурной маски, рассмотренного в главе 3.

На рисунке 3 показана упрощенная оптико-электронная функциональная схема новой КЛЗС.

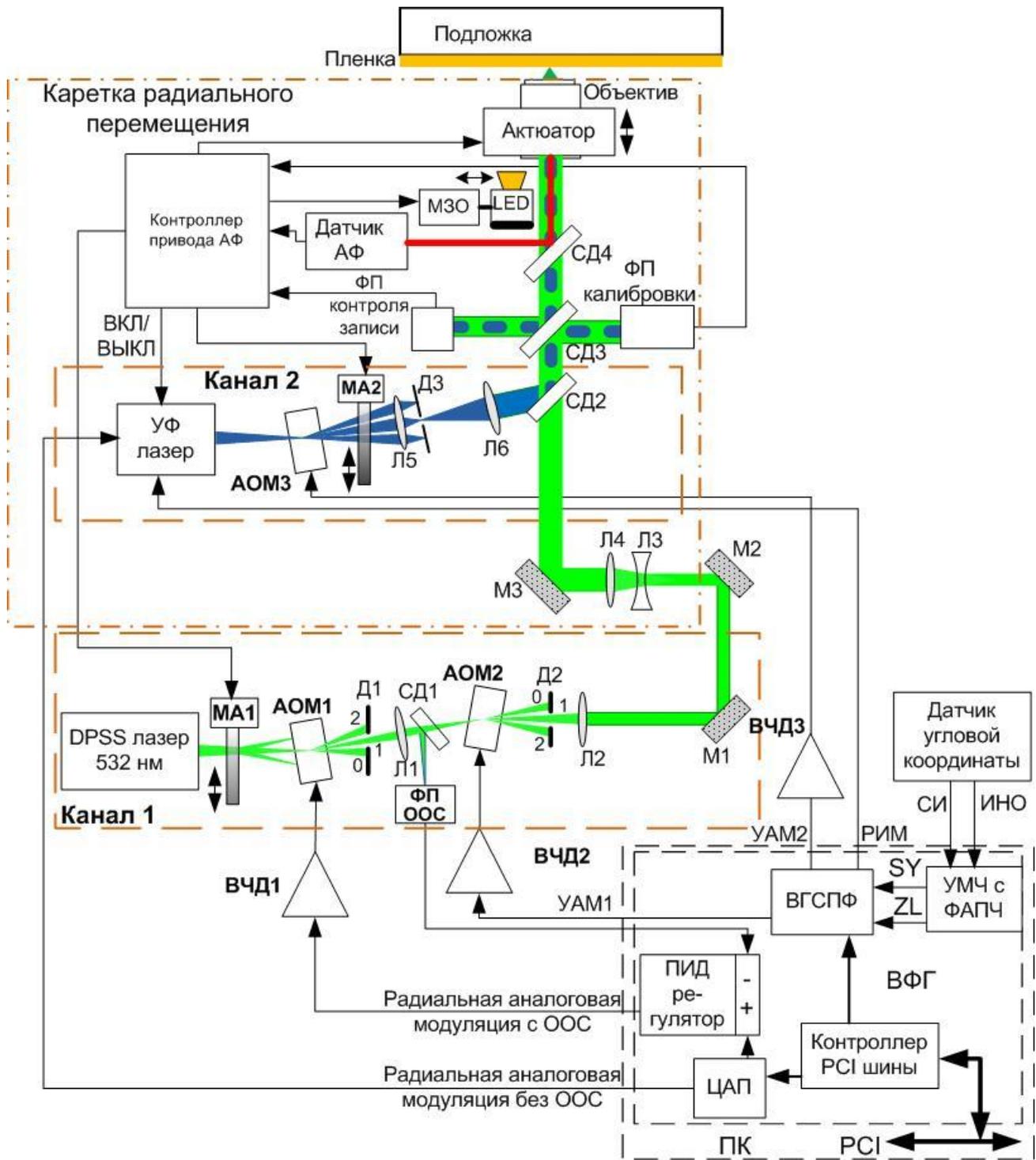


Рисунок 3.

В ней заложены следующие принципы построения – использование двух лазеров с существенной разницей по длине волны и мощности излучения, генерация обеими лазерами остросфокусированного выходного пучка, пространственное совмещение сфокусированных микрообъективом пучков обоих лазеров в одной плоскости, раздельное управление модуляцией интенсивности пучка по радиальной и угловой координатам для каждого лазера с одноступенчатой модуляцией по угловой координате и многоступенчатым управлением интенсивностью пучка по радиальной координате путем аналоговой и импульсной модуляции, а также

использования аттенюатора переменной плотности. КЛЗС должна также иметь фотоприемник контроля мощности пучка для обеспечения воспроизводимости режимов и фотоприемник контроля записи для синхронизированных с вращением заготовки фотоэлектрических измерений при поиске центра и измерения траектории пучка.

В качестве записывающих лазеров использовались диодный УФ лазер с длиной волны 405 нм и мощностью 30-120 мВт и DPSS лазер с длиной волны 532 нм и мощностью 2 Вт. Лазеры, изготавливаемые по заказу специально для CLWS-300, генерируют сходящийся лазерный пучок. Для АОМ1, осуществляющего медленную модуляцию мощного излучения DPSS лазера по радиальной координате, диаметр перетяжки – 180-200 мкм, а для высокоскоростного АОМ3 - 80-120 мкм. В канале 1 перетяжка пучка из АОМ1 переносится в АОМ2 линзой Л1 с уменьшением для увеличения полосы модуляции. Линза Л2 коллимирует пучок перед направлением зеркалами М1 и М2 на каретку для совмещения с пучком из канала 2 на светоделителе СД2. Диафрагмы Д1-Д3 выделяют первый дифракционный порядок после модуляторов. Линзы Л3-Л6, установленные на каретке радиального перемещения, используются для формирования на входной апертуре микрообъектива ( $NA=0,65$ ) пучков диаметром 5-5,5 мм с расходимостью, обеспечивающей фокусировку обеих пучков в плоскость фокусировки лазерного пучка датчика АФ ( $\lambda=650-660$  нм). Мощность излучения DPSS лазера при записи устанавливается на уровне, достаточном для записи на максимальном радиусе поля записи. Грубая подстройка мощности в соответствии с размером текущего изготавливаемого элемента производится моторизованным дифракционным аттенюатором МА1 с переменным пропусканием [26].

Управление интенсивностью обеих лазерных пучков в зависимости от радиальной и угловой координаты осуществляется от компьютера (ПК) посредством платы векторного функционального генератора (ВФГ) и контроллера привода АФ, связанного с компьютером через локальную сеть. ПИД регулятор с отрицательной обратной связью по сигналу с фотоприемника ФП ООС (он преобразует пучок от светоделителя СД1) управляет АОМ1 через высокочастотный драйвер ВЧД1 в соответствии с уровнем задаваемым цифро-аналоговым преобразователем ЦАП от компьютера для текущего значения радиальной координаты. В канале 2 сигнал от ЦАП подается непосредственно на вход аналогового управления током УФ лазера, работающего без внешней обратной связи.

Так как для записи одномоментно используется только один канал, то ВФГ управляет каналом 1 и каналом 2 как одним и тем же каналом. Сигнал угловой аналоговой модуляции УАМ1 для канала 1 и его масштабированная копия УАМ2 для канала 2 вырабатываются в соответствии с расчетным уровнем фазы векторным генератором сигналов произвольной формы (ВГСПФ). Он входит в состав ВФГ. С

помощью ВЧ драйверов ВЧД2 и ВЧД3 УАМ1 и УАМ2 преобразуются в ВЧ сигнал для АОМ2 и АОМ3. Формирование УАМ1 и УАМ2 производится по синхроимпульсам SY (их количество  $N_{SY}$  на оборот устанавливается от 2,5 до 3,5 миллионов) и импульсам начала оборота ZL, вырабатываемых умножителем частоты с фазовой автоподстройкой частоты (УМЧ с ФАПЧ) из тактовых импульсов СИ (18-36 тысяч на оборот) и импульсов начала оборота ИНО с углового датчика.

Компактность диодного УФ лазера и использование только одного АОМ3 (с несущей частотой 200 МГц) в канале 2 позволили поместить его целиком на каретке радиального перемещения. В связи с этим часть функций по управлению режимами записи передана цифровому контроллеру привода автофокусировки (АФ). Этот контроллер осуществляет изменение пропускания моторизованного дифракционного аттенюатора с переменным пропусканием МА2, переключение моторизованного затвора-осветителя (МЗО), низкочастотное полное включение и выключение диодного лазера, не синхронизированное с угловой координатой.

Управление каналом 2 с диодным УФ лазером более сложное, чем каналом 1, так как он предназначен для записи на фоточувствительных материалах, требующих изменения интенсивности пучка пропорционально радиальной координате. При скорости  $v$  вращения шпинделя 10 об/с линейная скорость  $V$  сканирования пучка изменяется от 0,03 мм/с на радиусе 0,5 мкм до  $8,8 \cdot 10^3$  мм/с на максимальном для CLWS-300 радиусе записи 140000 мкм ( для заготовки с максимальным диаметром 285 мм). При этом также необходимо обеспечивать локальный диапазон изменения экспозиции по угловой координате, не менее чем 1:100 для формирования многоуровневого фазового рельефа. Прецизионное аналоговое изменение интенсивности пучка в диапазоне  $1:2,8 \cdot 10^7$  трудно осуществимо на практике. Для решения этой задачи разработан метод многоступенчатого управления величиной локальной экспозиции, основанный на аналоговой модуляции интенсивности с помощью отдельного АОМ только по угловой координате и компенсации изменения линейной скорости сканирования в диапазоне не менее чем  $1:2,8 \cdot 10^5$  путем совместного действия дифракционного аттенюатора МА2, аналоговой модуляции тока УФ лазера, а также радиальной (то есть зависящей от радиальной координаты) импульсной модуляции (РИМ) тока лазера и аналогового сигнала угловой аналоговой модуляции, генерируемого ВГСПФ для АОМ3, выполняющего угловую аналоговую модуляцию (УАМ1 или УАМ2). Импульсная модуляция заменяет изменение интенсивности на изменение скважности импульсов при низких скоростях сканирования пучка. Сигнал РИМ накладывается на угловую аналоговую модуляцию (УАМ2 на рисунке 3) с задержкой, равной задержке в АОМ3 (временная диаграмма на рисунке 4) и подается на вход цифровой модуляции УФ диодного лазера. Режим импульсной модуляции может применяться также и для канала с DPSS лазером, но в этом случае сигнал РИМ накладывается только на УАМ1

(Рисунок 3). Период импульсов РИМ пропорционален заданному шагу  $\delta$  между точками включения импульсов, поддерживаемому постоянным для сохранения условий экспонирования. Для того, чтобы минимизировать сшивку начала и конца кольцевого трека желательно, чтобы длина кольцевого трека была кратна  $\delta$ . Это возможно, если выбрать  $\delta$  равным  $\pi \cdot s/4$  или  $\pi \cdot s/3$ , где  $s$  – шаг радиального сканирования. В ИАиЭ для синтеза РОЭ на КЛЗС разработан полярно-координатный psc-формат данных, в котором линейный размер пикселей постоянен вдоль каждого кольцевого трека и равен  $\pi \cdot s/4$ . Поэтому во избежание образования муара между двумя системами дискретизации оптимальным шагом для импульсной модуляции является также  $\pi \cdot s/4$ . Длительность  $T_{pulse}$  импульсов РИМ постоянна и выбирается так, чтобы движение пучка относительно подложки во время импульса не расширяло область экспонирования одним импульсом более чем на четверть. Из-за того, что динамический диапазон цифровой импульсной модуляции диодного УФ лазера ( $P_{on}/P_{off}$ ) не превышает 250, устанавливается также условие на максимальную скважность импульсов  $\tau/T_{pulse}$ . Таким образом, диапазон изменения скважности РИМ определяется следующим неравенством

$$4 < \tau/T_{pulse} < K_{AOM} \left( 0.1 \frac{P_{on}}{P_{off}} + 1 \right), \quad (1)$$

где  $K_{AOM}$  - контрастное отношение модуляции АОМ. Для серийно выпускаемых АОМ и ВЧ драйверов  $K_{AOM} \geq 1000$ .

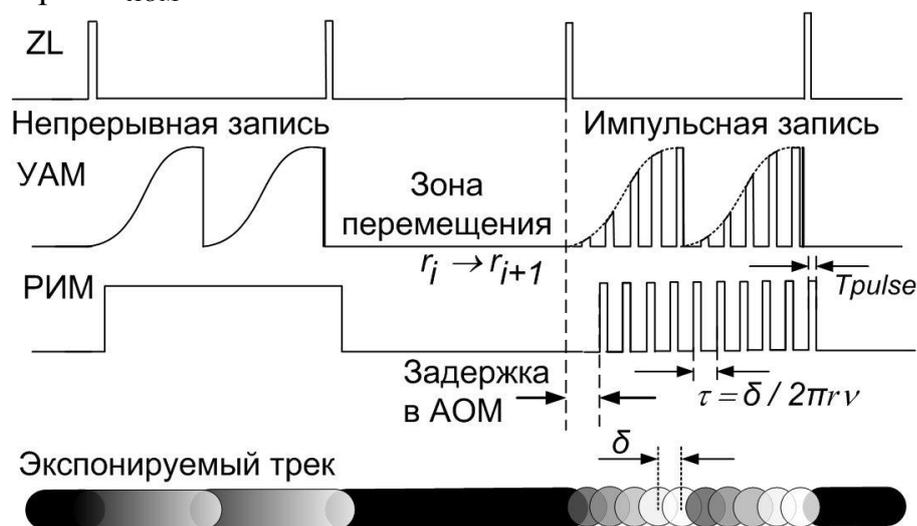


Рисунок 4.

Анализ показал, что требуемая компенсация изменения линейной скорости сканирования в радиальном диапазоне записи 0.5-140000 мкм при типовых параметрах КЛЗС достигается при делении этого диапазона на 3 поддиапазона. В 1-м внешнем поддиапазоне при движении пучка от периферии к центру вращения уменьшается ток лазера пропорционально радиальной координате. При достижении предельного для точного управления уровня мощности 3-5% от максимума

производится переключение МА2 на величину пропускания примерно в 20-30 раз меньшую чем для 1-го диапазона. С этого момента начинается запись во втором поддиапазоне снова с высокой мощности пучка. При очередном достижении уровня 3-5% от максимальной мощности происходит переход к внутреннему 3-му поддиапазону, где включается режим РИМ, с частотой пропорциональной радиальной координате  $r$ .

Совместное влияние перечисленных способов регулирования экспозиции можно свести к следующим выражениям для величины экспозиции для непрерывной записи  $E_{cw}$  в 1-й и 2-й зонах и импульсной записи  $E_p$  в 3-й зоне:

$$E_{cw} = \frac{2\beta P_{cw} \cdot T_{YAM} T_A}{\pi^2 r v s}, \quad E_p = \frac{2\beta N_{pls}}{\pi^2 N_\tau} \left( 1 - \frac{T_{front} v N_{SY}}{2N_{pls}} \right) \frac{P_{pulse} \cdot T_{YAM} \cdot T_A}{s \cdot r \cdot v}, \quad (2)$$

где  $\beta$  - коэффициент, зависящий от поглощения фоторезиста и пропускания компонентов оптического канала за исключением АОМ и аттенюатора,  $P_{cw}$  - уровень мощности лазера при непрерывной записи,  $P_{pulse}$  - уровень мощности лазера при импульсной записи,  $T_{YAM}$  - коэффициент пропускания модулятора, отвечающего за угловую аналоговую модуляцию,  $T_A$  - коэффициент пропускания аттенюатора,  $T_{front}$  - длительность фронта/спада световых импульсов на выходе АОМ3,  $N_p$  и  $N_\tau$  - количество синхроимпульсов SY, соответственно в импульсе  $T_{pulse}$  и периоде импульсов  $\tau$  для РИМ. При переходе от непрерывной записи к импульсной записи мощность пучка  $P_{pulse}$  выбирается из условия  $P_{pulse} = P_{cw} \cdot \tau / T_{pulse}$  для непрерывности величины экспозиции. На основе этого условия (1) и выражений (2) для различных типов и размеров РОЭ сформулированы алгоритмы расчета параметров для согласованного управления мощностью УФ лазера, пропусканием АОМ3 и дифракционного аттенюатора МА2, а также импульсной последовательности РИМ.

Новые схемные решения и методы управления реализованы на CLWS-300IAE

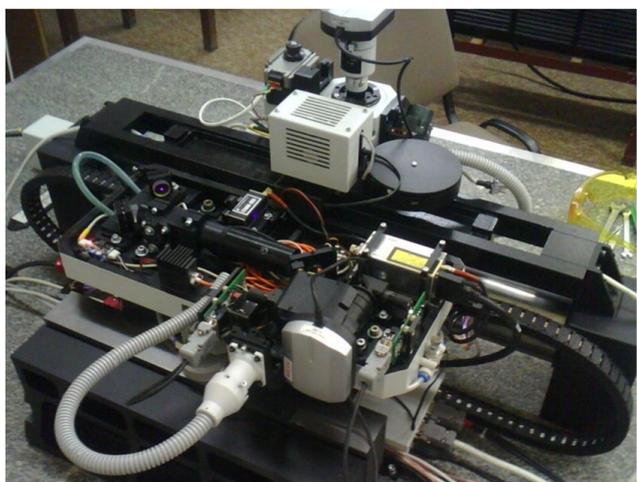


Рисунок 5.

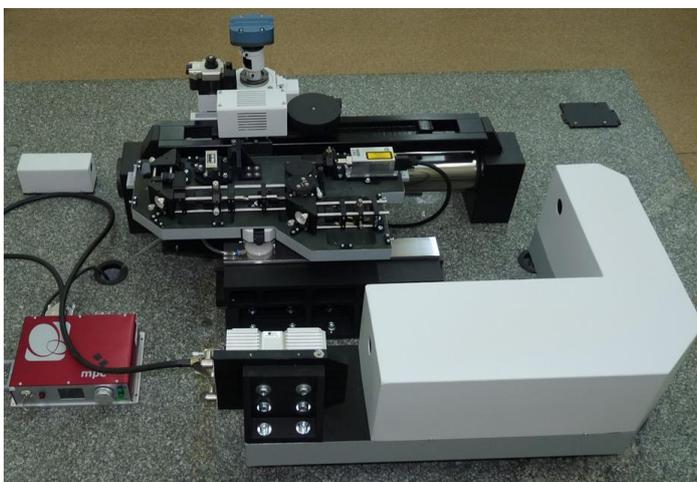


Рисунок 6.

и заказных КЛЗС, созданных совместно с КТИ НП СО РАН. На рисунке 5 показана фотография варианта КЛЗС, спроектированной только для записи на фоторезисте. Она имеет главный записывающий УФ диодный лазер и дополнительный твердотельный лазер с волоконным выводом излучения, предназначенный для формирования и измерения юстировочных кольцевых меток. На рисунке 6 показана фотография варианта КЛЗС с двумя записывающими лазерами, созданного по функциональной схеме на рисунке 3 для прямой лазерной записи фотошаблонов на термочувствительных материалах и РОЭ на фоторезисте.

Во второй главе описываются результаты разработки лазерных технологий записи ПФ. Экспериментально исследована термоструктурная лазерная запись на пленках негидрогенизированного аморфного кремния (a-Si), ставшего одним из первых материалов, на котором было продемонстрировано изготовление ПФ с высокой механической и химической стойкостью на основе лазерной литографии со сканирующим пучком. Принцип регистрации полутонового изображения на этом материале основан на изменении поглощения пленки при плавном переходе от аморфного состояния к кристаллическому при нагреве лазерным пучком. Микрофотография ПФ для синтеза РОЭ, изготовленного в ИАиЭ СО РАН на КЛЗС, показана на рисунке 7. В качестве материала для ПФ исследованы пленки a-Si толщиной 50-200 нм, напыленные методами ионно-плазменного и магнетронного распыления, электронно-лучевого напыления и плазмохимического осаждения из газовой фазы. Показано, что значительное уменьшение коэффициента пропускания наблюдается для пленок всех типов. Для пленок толщиной 100-110 нм под действием лазерного излучения коэффициент пропускания  $T_{ir}$  изменяется от 0,5-2% до 10-20% в зависимости от способа нанесения. При этом пленка не плавится и не испаряется.



Рисунок 7.

Зависимость относительного изменения коэффициента пропускания от мощности записывающего пучка  $P$  для пленок, полученных ионно-плазменным распылением, показана на рисунке 8, а. Имеется достаточно линейная часть зависимости между минимальной  $P_{min}$  и максимальной  $P_{max}$  мощностью, которую можно использовать для записи полутоновых изображений. Контраст записи, понимаемый как отношение максимального значения  $T_{ir}$  коэффициента пропускания облученной пленки к значению  $T_a$  для исходной аморфной пленки, может достигать 10 для  $\lambda = 436$  нм. Требуемый для записи диапазон мощности пучка от  $P_{min}$  до  $P_{max}$  также в свою очередь зависит от скорости сканирования пучка (рисунок 8, б). Результаты

исследования термоструктурной лазерной записи на пленках аморфного кремния показали возможность полутонковой регистрации изображений с пространственным разрешением до  $2000 \text{ мм}^{-1}$  при диаметре записывающего пучка  $0,6 \text{ мкм}$  (по уровню  $1/2$ ).

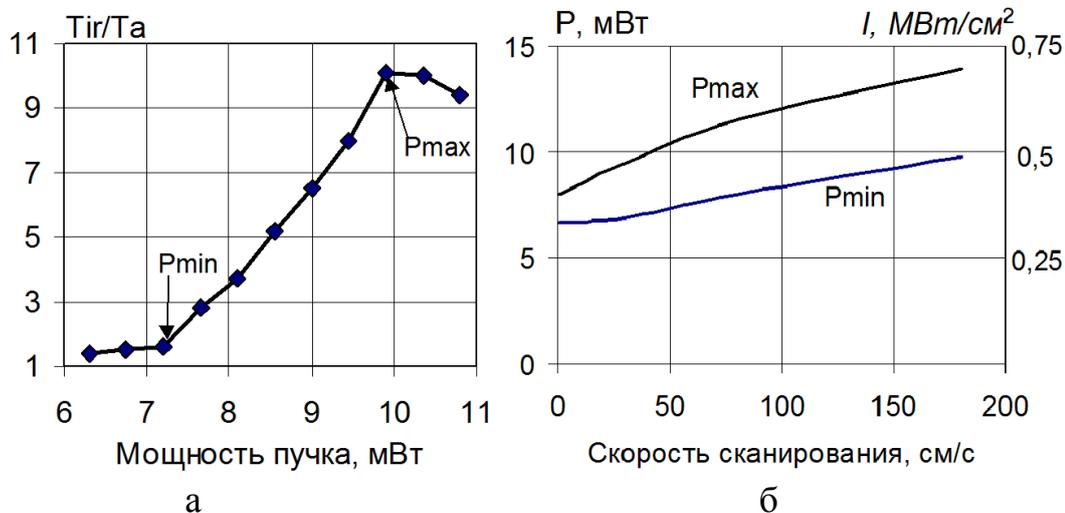


Рисунок 8.

При сканирующей записи ПФ сфокусированным лазерным пучком на пленках a-Si впервые обнаружен эффект оконтуривания границ микроизображений с переходом от низкого пропускания к высокому. Он связан с тем, что при резком повышении мощности пучка в первый момент она оказывается избыточной, так как пучок проходит по пленке с большим поглощением и требуется меньше мощности для записи. При последующих проходах часть пучка движется по осветленной пленке, и поглощение излучения уменьшается. Поэтому требуется большая мощность для достижения того же значения  $T_{ir}/T_a$ . Предложены несколько методов преодоления эффекта оконтуривания при записи полутонковых фотошаблонов в зависимости от типа рисунка.

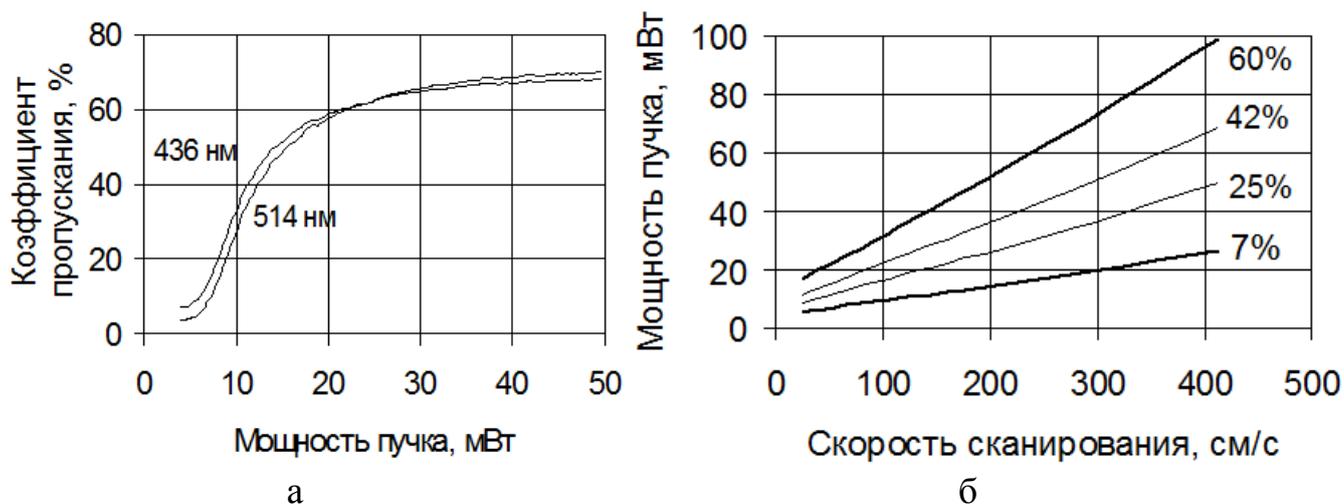


Рисунок 9.

Вторая часть второй главы посвящена исследованию поверхностно-модифицированных LDW-стекол - перспективного материала для полутонковой

лазерной технологии записи [27]. Приповерхностный слой этих стекол толщиной 1-2 мкм содержит наночастицы серебра, поглощающие свет. Сфокусированный лазерный пучок осуществляет тепловое стирание окрашенных частиц за счет химического связывания свободного металлического серебра. Коэффициент пропускания  $T_{ir}$  зависит от мощности пучка и его можно менять от первоначального значения 0,1 – 5 % (есть стекла трех типов с пропусканием от 5% для типа I до 0,1% для типа III) до 70-80 %.

Во второй главе приводятся результаты количественного исследования поведения LDW-стекол типа I и GS-11 (новый ахроматизированный тип LDW-стекла) при различных режимах записи: зависимости коэффициента пропускания от мощности пучка (рисунок 8, а) на разных длинах волн, зависимости мощности пучка, необходимой для получения заданного коэффициента пропускания, от скорости сканирования (рисунок 8, б). Количественно исследовано пространственное разрешение и определена взаимосвязь пространственного разрешения и изменения коэффициента пропускания. При диаметре лазерного пучка 0,6 мкм (по уровню 1/2) ширина дорожки не превышает 1 мкм в диапазоне коэффициента пропускания до 60%. При  $T_{ir} > 60\%$  пространственное разрешение существенно падает.

Для повышения точности записи ПФ предложено использовать режим импульсной записи вблизи центра вращения подложки, описанный в главе 1. В этом случае мощность лазерного пучка, необходимая для достижения заданного уровня пропускания, слабо зависит от скорости сканирования до 70-80 мм/с, что облегчает тестирование материала.

В третьей главе в первой части рассмотрены базовые принципы прямой лазерной записи РОЭ на фоторезисте и оптимизация формируемого в фоторезисте распределения экспозиции с целью повышения дифракционной эффективности при синтезе РОЭ с кусочно-непрерывным рельефом. На основе численного моделирования процесса ПЛЗ изучено влияние шумов системы радиального перемещения на дифракционную эффективность элементов (рассчитываемую в рамках скалярной теории дифракции) в первом порядке ( $DEI$ ). Показано, что увеличение шага радиального перемещения и диаметра пучка может существенно поднять  $DEI$  для РОЭ с низкими пространственными частотами при записи на системе с большими шумами позиционирования (до  $\delta x = 50$  нм (СКО)). Из анализа следуют, что для ДОЭ, работающих в высоком порядке дифракции, ошибки позиционирования пучка могут значительно уменьшить дифракционную эффективность. Решетки в третьем порядке могут дать существенное преимущество, только если  $\delta x \leq 10$  нм. Решетки во втором порядке могут быть использованы для широкого диапазона периодов при  $\delta x \leq 20$  нм, но с достаточно малым (0.25 мкм) шагом сканирования. Если  $\delta x = 30$  нм, то работа во втором порядке эффективна

только для решеток с периодом менее 7-10 мкм. Далее первый порядок с шагом сканирования 0.25 мкм становится более выгодным. Показано, что шаг сканирования равный 0.4-0.5 диаметра пучка предпочтительнее для пассивной минимизации влияния ошибок позиционирования.

Во второй части третьей главы анализ применения попиксельной оптимизации распределения экспозиции [28] к ПЛЗ кусочно-непрерывного дифракционного микрорельефа на фоторезисте позволил сделать следующие предположения: существенное изменение данных для экспонирования происходит в основном вблизи границ дифракционных зон; форму скорректированных данных можно упростить, объединив соседние пиксели с близкой интенсивностью в одну ступеньку; форма обратного ската и коррекция данных для записи слабо зависят от периода зон, так как обратный скат гораздо круче, чем угол «блеска» дифракционных зон. Такая приграничная оптимизация при модуляции интенсивности в диапазоне 0...1,5 от максимальной величины для неоптимизированной записи и  $DE1$  в качестве критерия оптимальности продемонстрировала, что три ступеньки в ступенчатой переходной функции (СПФ) при таких условиях вполне достаточно. На рисунке 10, а показан пример оптимизированного ряда расчетных данных для экспонирования линейной решетки со встроенной трехступенчатой СПФ и результат его свертки с распределением интенсивности гауссова пучка диаметром  $w=1.65$  мкм (по уровню 0.5) (штрих-пунктирная кривая), показанный непрерывной кривой. Первая и вторая ступени - на стороне максимальной экспозиции, а третья ступень 3 - на стороне минимума. В общем случае, когда существует  $N$  шагов в СПФ, то есть  $2N$  переменных для оптимизации: мощность  $P_i$  для каждой ступени и ширина  $W_i$ . Уровни мощности  $P_i$  ограничены в некотором диапазоне, но ограничения на ширину  $W_i$  не требуются.

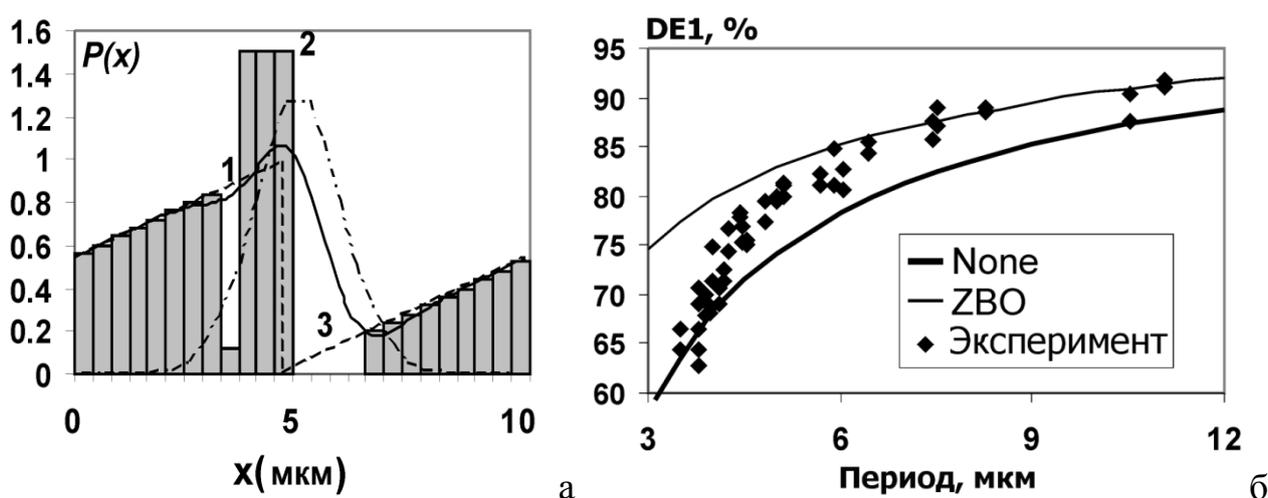


Рисунок 10.

Существенным фактором, упрощающим практическую реализацию приграничной оптимизации, стало доказательство того что универсальная форма СПФ может эффективно применяться к различным периодам зон. Из результатов

оптимизации следует, что общая ширина универсальной СПФ не превышает удвоенного диаметра записывающего пучка по уровню  $e^{-2}$ . Этот подход назван методом приграничной оптимизации (далее используется сокращение ZBO от англоязычного варианта «zone boundary optimization», использованного в публикациях).

На рисунке 10, б показана зависимость  $DEI$  (ромбы) от периода дифракционных зон, измеренная на нескольких ДОЭ, записанных на фоторезисте с оптимизацией методом ZBO при диаметре пучка 0,6 мкм. Тонкая кривая показывает расчётную  $DEI$  для оптимизированной записи, а жирная кривая -  $DEI$  для неоптимизированной записи. Меньшая реальная эффективность при малых периодах по отношению к результатам моделирования оптимизированного профиля объясняется дополнительным эффектом сглаживания обратного ската при жидкостном проявлении фоторезиста, в то время как использованная модель ПЛЗ учитывала только измеренное распределение интенсивности в записывающем пучке с кольцом вокруг центрального пика.

Далее в третьей главе рассмотрена специфика применения СПФ при сочетании импульсной и непрерывной записи, а также при одномерном (осесимметричные ДОЭ для КЛЗС) и двумерном (произвольные кусочно-непрерывные ДОЭ) описании микроструктуры ДОЭ. Для одномерных ДОЭ предложено устанавливать собственную координатную сетку в каждой дифракционной зоне, чтобы точно встраивать СПФ на границах зон в расчетной структуре ДОЭ.

Для повышения точности моделирования микрорельефа при оптимизации предложено использовать модель, рассматривающую конечный профиль  $H(x)$  как результат свертки набора данных для экспонирования  $P(x)$  с эквивалентным распределением интенсивности, названным обобщенной функцией рассеяния точки (ОФРТ)  $G(x)$ , характеризующей весь процесс изготовления:

$$H(x) = \beta(G(x) \otimes P(x)).$$

В случае достаточно большого периода зон расчетный профиль микрорельефа может быть аппроксимирован вблизи границы зон как кусочно-постоянная функция  $sign(x)$ . В этом случае можно рассчитать ОФРТ дифференцированием измеренной профилограммы  $H_m(x)$  микрорельефа вблизи перепада рельефа:

$$G(x) = dH_m(x) / dx.$$

Приграничная оптимизация на основе ОФРТ применена к полутонковой проекционной фотолитографии с растриваемым фотошаблоном. ОФРТ рассчитывалась по результатам обработки микрофотографии скола образца с микрорельефом, полученной на электронном микроскопе. Расчеты показали возможность увеличения дифракционной эффективности от 7% для периода 20 мкм до 20% для периода 6 мкм.

В заключительной части третьей главы обсуждается метод контурной маски, кардинально решающий проблему обратных скатов дифракционных зон за счет комбинирования преимуществ бинарной многошаблонной и аналоговой технологий – вертикальные края зон, формируемые при «сухом» травлении (например, реактивном-ионном травлении) через металлическую маску, и пологий рельеф между границами, достигаемый при полутонковой технологии. Несколько вариантов такого процесса предложены в [29]. В настоящей работе предлагается более простой с технологической точки зрения вариант этого метода с поверхностной контурной маской (ПКМ), выполняемой в виде тонкопленочных металлических линий вдоль границ дифракционных зон, без внедрения вглубь подложки (этап 1 на рисунке 10, а). Вертикальные границы дифракционных зон формируются при переносе рельефа из фоторезиста в материал подложки реактивным ионным травлением, которое не травит подложку на участках, закрытых ПКМ (этап 2 на рисунке 10, а). Показано, что максимальная  $DEI$  может быть достигнута, если ширина  $D1$  линий ПКМ, нормированная на  $w$ , увеличивается с ростом периода  $Tr$  дифракционных зон по зависимости, показанной на рисунке 11, б от 0,9 до 1,8, аппроксимируемой с высокой точностью выражением  $D1/w=0,3136 \cdot \ln(Tr/w)+0,5407$ . Ширина  $D1$  может оставаться неизменной, если  $Tr/w > 20$ . При этом  $D1$ , нормированная на ширину обратного ската  $BWS$ , определяемого как расстояние между максимумом и минимумом рельефа у границы, остается практически неизменной для всех  $Tr/w$ . При ошибке  $D1$  до  $\pm 20\%$  дифракционная эффективность в нулевом порядке остается менее 1%, а относительное падение  $DEI$  не превысит 2.5%. Ошибка совмещения не должна превышать 10% от  $w$ , а ошибка глубины травления - 5% от расчетной глубины дифракционного рельефа.

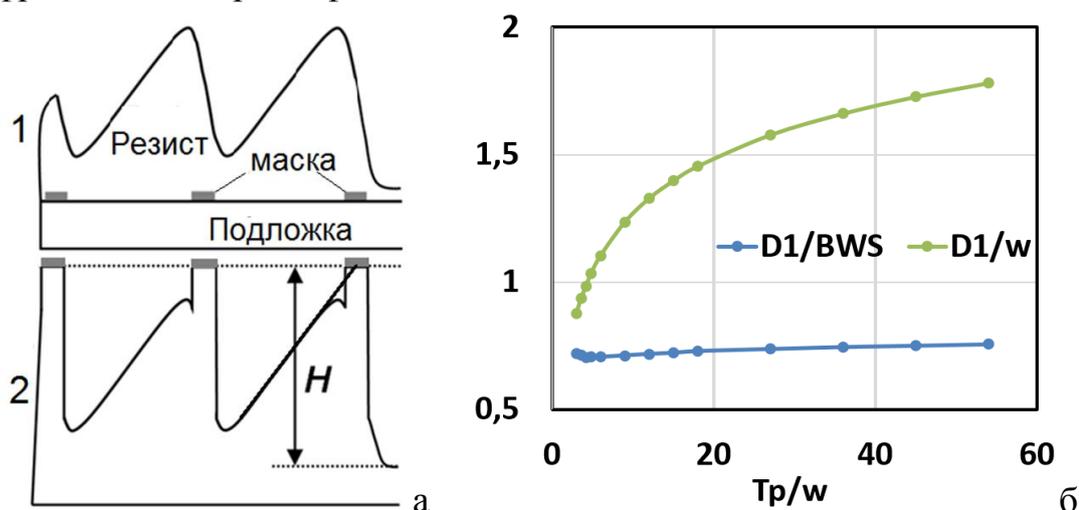


Рисунок 11.

Рисунок 12 демонстрирует зависимости дифракционной эффективности ( $DE$ ) для различных методов оптимизации от нормализованного периода линейных решеток  $T/(M \cdot Rs)$ , где  $Rs$  – радиус пучка по уровню  $e^{-2}$ ,  $M$  – порядок дифракции. Кривые СМ1-СМ3 относятся к ОКМ для линейных решеток, работающих в

порядке дифракции с 1-го по 3-ий. Аналогично кривые M1-M3 относятся к неоптимизированной ПЛЗ при M, равном от 1 до 3. Кривая Diff дает зависимость для дифференциального алгоритма [28], SQP – метод последовательного квадратичного программирования [28], ZBO6 – ZBO метод с 6-ти ступенчатой СПФ.

ОМКМ существенно превосходит другие методы повышения дифракционной эффективности.

Увеличение дифракционной эффективности в первом порядке может достигать 18-28 % для малых периодов по сравнению с известными методами оптимизации микрорельефа. Исходя из жестких требований при работе в высоких порядках дифракции на глубину рельефа и его неровность можно заключить, что ОМКМ с  $M=1$  делает излишним их использование для увеличения

дифракционной эффективности. Для конкретных приложений необходимо принять во внимание, что зависимости на Рисунке 12 достоверны для периодов зон существенно больших длины волны.

Предложенный метод может быть полезен для систем лазерной, электронно-лучевой и проекционной литографии, формирующих рельеф в резисте с обратным скатом шириной более 1 мкм, так как позволяет значительно увеличить дифракционную эффективность без повышения пространственного разрешения. Однако, технологические системы для его реализации должны иметь систему совмещения с микроструктурой ПКМ, записанной до нанесения и экспонирования фоторезиста. Рассмотренные в третьей главе методы повышения дифракционной эффективности объединяет общий принцип – модификация микрорельефа на участках вблизи границ дифракционных зон с шириной, не превышающей удвоенный диаметр записывающего пучка для прямой лазерной записи или удвоенную ширину ОФРТ для полутонковой фотолитографии.

В четвертой главе рассмотрены вопросы контроля характеристик микрорельефа РОЭ. Для того чтобы не создавать специальных подходов к каждому типу многообразных форм микрорельефа РОЭ их контроль удобнее вести по однотипным тестовым структурам. Дифракционные решетки с кусочно-непрерывным рельефом являются оптимальным выбором для этого, так как позволяют характеризовать точность формирования заданной формы пологой части и обратные скаты дифракционных зон. Их эффективность легко померить и сопоставить с расчетной. Профилометрический контроль микрорельефа РОЭ

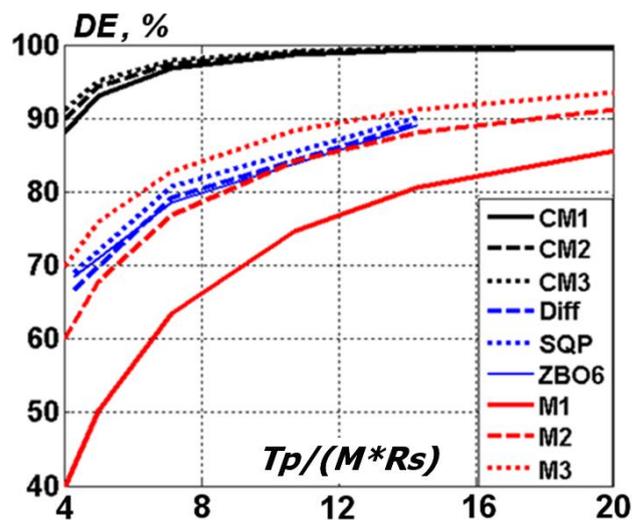


Рисунок 12.

затрудняется тем, что в настоящее время программное обеспечение промышленно выпускаемых профилометров не имеет функций математической обработки, предназначенных для дифракционной оптики и микрооптики. Для мелкосерийного и промышленного производства РОЭ требуется оперативный контроль на основе минимального количества параметров. При синтезе ДОЭ наклон каждой дифракционной зоны обычно уникален. В то же время идентификация зон в системе координат профилометра весьма сложна. Поэтому в общем случае невозможно сравнить измеренный и расчетный угол наклона данной дифракционной зоны. Высота скачка микрорельефа между соседними зонами, тоже не является надежным параметром, в силу сглаженной формы и, как правило, неверной передачи профилометрами формы рельефа на краях зон. Кроме этого неровность микрорельефа и шумы профилометра также осложняют его оценку. Естественным решением всех этих проблем является полиномиальная аппроксимация профиля каждой дифракционной зоны в отдельности с удалением из рассмотрения области обратного ската.

Очевидно, что при отработанной технологии изготовления с малыми искажениями формы достаточно использовать линейную или параболическую аппроксимацию для дифракционных зон вдали от экстремумов фазовой функции. Однако прежде чем аппроксимировать профиль дифракционных зон необходимо устранить ненадежные данные вблизи их границ. Это может быть осуществлено согласно алгоритму обработки профилограммы, стадии которого показаны на рисунке 12. Расчетный профиль 1, сформированный на поверхности пленки или подложки, отображается профилометром в виде графика 2. Из этих данных после сглаживания, дифференцирования и нахождения экстремумов определяется положение границ дифракционных зон. Ненадежная область вокруг этих границ (от  $B_1$  до  $B_2$ ) может быть определена как область между точками вокруг границы, где производная пересекает ноль или как типовая для данного профилометра величина. Линейная аппроксимирующая функция  $y_i(x) = a_i x + b_i$  находится для каждой  $i$ -ой зоны отдельно между этими граничными участками (график 4). Аппроксимирующая функция  $y_i(x)$  экстраполируется до границ зон. На основании этой экстраполяции можно ввести новый параметр количественной оценки дифракционного микрорельефа – аппроксимированную высоту - разность высот между точками пересечения кривых, аппроксимирующих наклон поверхности дифракционных зон, с границами зон. Эта величина может быть определена двумя путями в зависимости от особенностей профилограммы.

Если профилограмма включает только одну целую зону и наклон базовой поверхности подложки ДОЭ не значителен, то аппроксимирующая глубина  $H_1$  может быть вычислена как  $H_1 = y_i(x_1) - y_i(x_2)$ , где  $x_1$  и  $x_2$  - координаты границ дифракционной зоны (рисунок 13). Данный метод определения

аппроксимированной глубины назван «двухграничным» методом. Если профилограмма содержит хотя бы две дифракционные зоны, то аппроксимированная глубина  $H_2$  может быть определена как  $H_2 = y_i(x_2) - y_{i+1}(x_2)$ . Данный метод определения аппроксимированной глубины назван «одногограничным». Линейная аппроксимация в описанных выше методах может быть заменена для случая ее расчетной нелинейности микрорельефа на полиномиальную. Обычно достаточно использовать полином второй степени.

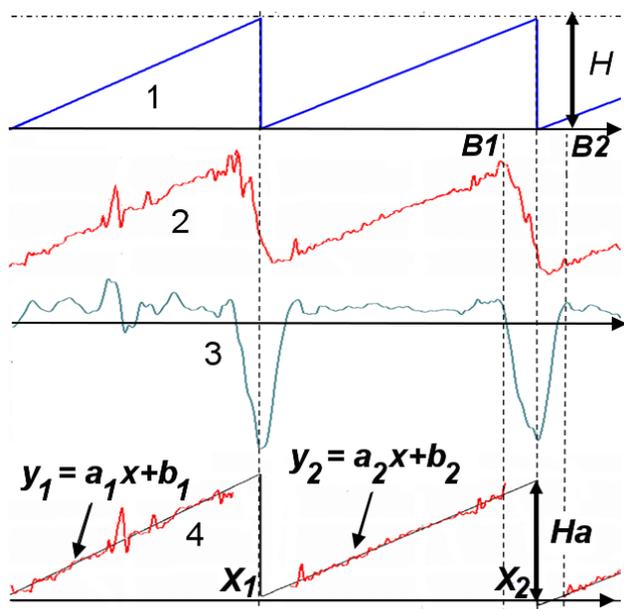


Рисунок 13.

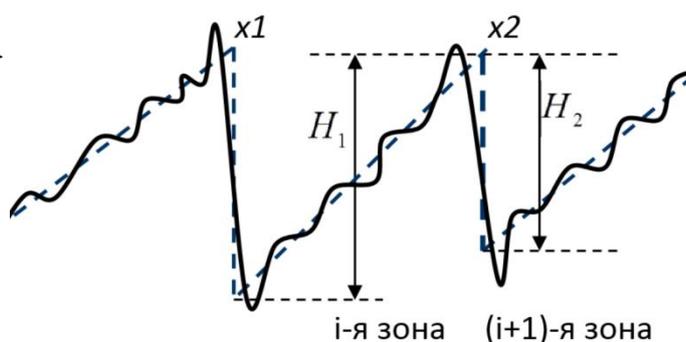


Рисунок 14.

При программной реализации аппроксимации экспериментальных данных также легко получить информацию о среднеквадратичной ошибке отклонения экспериментальных данных от аппроксимирующей кривой, которая дает дополнительную информацию об ошибках изготовления. Таким образом, графическая форма представления данных, сложная для оперативной оценки микрорельефа может быть сведена к минимальному числу количественных характеристик формы и глубины микрорельефа, практически не зависящих от типа используемого профилометра, если не достоверная область на границах зон не превышает 10-20% от периода. Что легко соблюсти для тестовых структур.

Из выполненных оценок устойчивости методов к погрешностям определения границ и наклону профилограммы следует, что одногограничный метод аппроксимированной глубины наиболее устойчив. Однако стоит отметить, что, несмотря на лучшие результаты работы, одногограничная вариация метода требует больше данных по сравнению с двухграничным методом, так как для определения аппроксимированной высоты необходимы корректные аппроксимации хотя бы двух соседних зон.

В четвертой главе предложен и обоснован метод оценки дифракционной эффективности ДОЭ на основе ОФРТ и аппроксимации измеренной формы рельефа

дифракционных зон, позволяющий охарактеризовать энергетическую эффективность элемента не основе его выборочного профилометрического контроля.

В пятой главе рассмотрены примеры синтеза РОЭ на основе технологий полутонной фотолитографии и ПЛЗ на фоторезисте. Фотолитографическая технология синтеза РОЭ с помощью ПФ, сформированных на стекле LDW-I, апробирована при изготовлении серии дифракционных линз на подложках из плавленого кварца. Изготовлены линзы с диаметром 10-28 мм и фокусом 75-200 мм. Измеренная дифракционная эффективность превышала 80 % для большинства изготовленных линз. При записи ПФ на стекле GS-11 эффективность изготавливаемых ДОЭ должна быть выше, так как обратные скаты дифракционных зон линейных решеток, полученных в фоторезисте контактным копированием с тестовых ПФ из стекла GS-11, не превышают 0,8 мкм.

Рассмотрены методы записи ПФ с произвольным рисунком на КЛЗС. Продемонстрировано повышение качества ПФ, изготовленных с применением предложенного в главе 1 метода инкрементной записи. Экспериментально доказана возможность устранения оконтуривания дифракционных зон ПФ с помощью формирования короткого светового импульса перед экспонированием зон с понижением мощности пучка вдоль траектории его движения.



Рисунок 15.

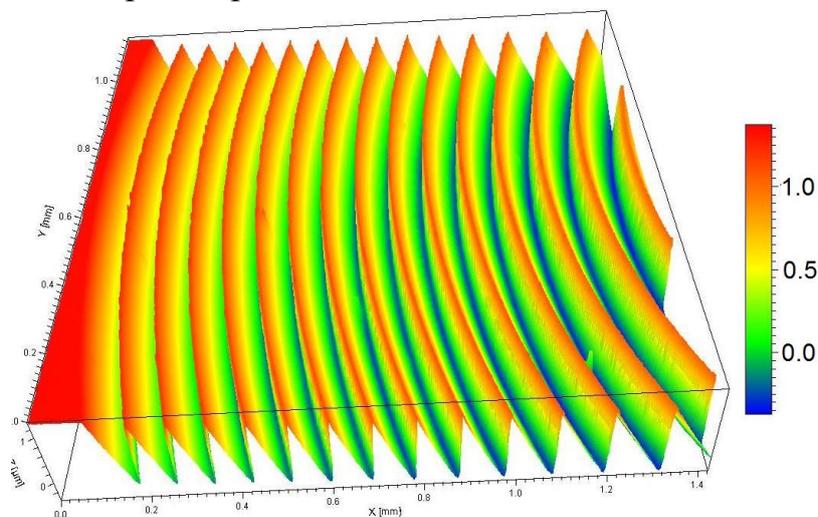


Рисунок 16.

Описываются результаты разработки и внедрения на практике технологии изготовления кварцевых матриц (Рисунок 15) с дифракционным микрорельефом (рисунок 16) для тиражирования бифокальных дифракционно-рефракционных интраокулярных линз, включающей лазерную запись фотошаблона для формирования полутонного распределения интенсивности в плоскости заготовки, покрытой фоторезистом, а также операции полутонной фотолитографии и реактивного ионного травления. Микроструктура матриц оптимизирована для минимизации биологических отложений, возникающих через длительное время после имплантации линзы, и получения одинаковой дифракционной эффективности

в нулевом и первом порядках дифракции. Оптимизация заключается в сглаживании микрорельефа и коррекции его глубины для компенсации влияния сглаженных обратных скатов на распределение эффективности по порядкам дифракции. Кроме этого, с точки зрения технологии оптимизирован рельеф первой дифракционной зоны. Разработанная технология дифракционных матриц реализована при производстве интраокулярных линз «МИОЛ-Аккорд», на медицинское применение которых получено разрешение Минздрава РФ.

Далее приведены результаты применения технологий синтеза РОЭ для изготовления растров микролинз, широко используемых в микротехнологии и метрологии, в том числе в датчиках Шэка-Гартмана. Рассмотрены результаты применения в таких датчиках внеосевых микролинзовых растров. Также приведены результаты применения КЛЗС для формирования в фоторезисте оригиналов голографических этикеток с комбинацией различных защитных элементов, включая псевдообъемные дифракционные барельефы, недоступные для синтеза на лазерных dot-matrix принтерах. По сравнению с электронно-лучевыми генераторами изображений КЛЗС позволяет реализовать существенно более высокую скорость записи и обладает индивидуальными особенностями, облегчающими защиту голографических этикеток от подделки на других устройствах.

Рассмотрены результаты разработки технологии изготовления РОЭ для коррекции аберраций волнового фронта излучения, генерируемого мощными твердотельными лазерами с активными элементами YAG:Nd<sup>3+</sup> диаметром 20 мм и более. Такие элементы, называемые также конформальными [30], относятся к классу оптических элементов со свободной формой поверхности. Их функция пропускания выбирается не из набора стандартных оптических поверхностей, а из условия компенсации искажений волнового фронта светового пучка, прошедшего через элементы с формой поверхности или распределением коэффициента преломления, зависящими от внешних неоптических по своей природе условий (например, аэродинамической формы или несовершенства роста структуры кристалла). Метод изготовления конформальных корректоров основан на использовании растрированного ПФ, используемого обычно для фоторастровой проекционной технологии [20]. Из-за большого светового поля корректора можно применять только контактную фотолитографию с зазором. Для этого случая модифицирован принцип расчета растрированного ПФ с учетом отсутствия пространственной фильтрации дифракционных порядков. Также предложено использовать только угловую модуляцию ширины прозрачных окон растра с постоянным их шагом по радиальной координате (рисунок 17, а) для снижения погрешности формирования распределения экспозиции. При копировании с зазором растрированный ПФ (рисунок 17, б) располагался на расстоянии 300-400 мкм от поверхности фоторезиста, нанесенного на кварцевую подложку. Микрорельеф,

сформированный после проявления экспонированного фоторезиста, переносился реактивным ионным травлением в кварцевую подложку. В результате, изготовленный конформальный корректор представлял собой оптическую подложку, одна из сторон которой имела форму, компенсирующую aberrации стержней, а вторая была отполирована до  $\lambda/20$ . Технология позволяет изготавливать одновременно несколько корректоров, что существенно поднимает ее экономическую эффективность. На рисунке 17, в показана интерферограмма пластины с тремя корректорами для разных кристаллов.

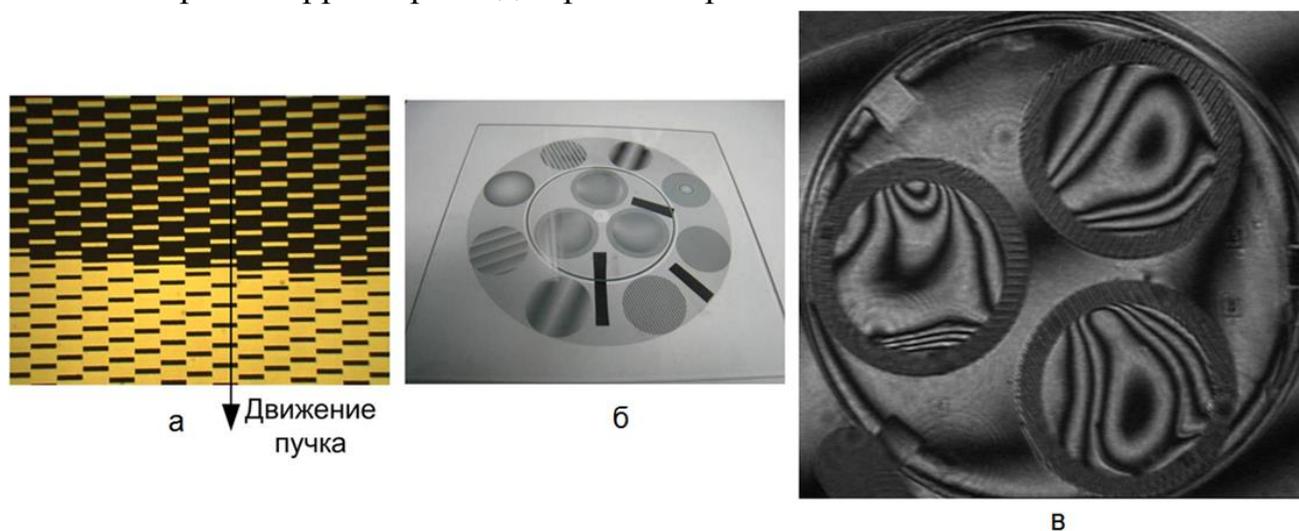


Рисунок 17.

Среднеквадратичное отклонение между фазовыми картами активного элемента и корректора не превысило  $\lambda/10$  при амплитуде исходных искажений до  $5\lambda$ , что доказывает перспективность предлагаемого подхода к решению задачи создания статических корректоров волнового фронта в твердотельных лазерах с кристаллами большого диаметра. Проведенные в ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина (г. Снежинск) исследования порога разрушения конформальных корректоров, изготовленных в ИАиЭ СО РАН, показали, что он превышает  $17 \text{ Дж/см}^2$  на длине волны  $1064 \text{ нм}$  при длине импульсов  $4 \text{ нс}$ .

В заключении сформулированы следующие результаты диссертации:

1. Разработаны и экспериментально реализованы принципы построения лазерных литографических систем с круговым сканированием на основе двух лазеров, а также методы управления лазерными пучками в них для формирования РОЭ и ПФ на основе фото- и термочувствительных материалов в поле диаметром свыше  $250 \text{ мм}$ , обеспечивающие управление экспозицией по угловой координате с диапазоном модуляции не менее чем  $1:100$  и компенсацию изменения линейной скорости сканирования в диапазоне более чем  $1:10^5$  за счет согласованного поэтапного управления модуляторами, током лазера, ступенчатым аттенюатором и режимами непрерывной и импульсной модуляции в зависимости от скорости

сканирования лазерного пучка, регистрирующего материала и выбора режима записи или тестирования.

2. Предложены методы измерения и анализа траектории движения записывающего пучка в лазерных литографических системах с круговым сканированием и расчета функции компенсации систематических погрешностей траектории для управления дефлектором пучка. Метод измерения основывается на записи кольца на заготовке при вращающемся шпинделе, последующем повороте подложки относительно планшайбы остановленного шпинделя на  $180^\circ$  и измерении угловой зависимости радиусов кольца с диаметрально противоположной стороны по отношению к положению лазерного пучка при записи кольца. Экспериментально получено уменьшение отклонения траектории записывающего пучка от круговой формы в 5 раз и уменьшение среднеквадратичного значения неосесимметричной ошибки волнового фронта, формируемого тестовыми дифракционными линзами, в 4 раза.

3. Предложен метод периодического измерения и коррекции дрейфа центра вращения заготовки в лазерных литографических системах с круговым сканированием, основанный на формировании серии меток под слоем фоторезиста и последовательном измерении и анализе их положения в процессе записи элемента для коррекции текущей радиальной координаты. Метод позволяет существенно сократить время на периодическую коррекцию начала радиальной координаты при записи на поверхностях вращения. Экспериментально показана возможность синтеза высокоэффективных ДОО с числовой апертурой свыше 0,15 и остаточной ошибкой волнового фронта до  $\lambda/20$  (СКО).

4. Исследовано воздействие сфокусированного лазерного излучения на оптические свойства пленок a-Si в диапазоне скоростей сканирования пучка от  $10^{-1}$  мм/с до  $2 \cdot 10^3$  мм/с. Показана возможность прямой лазерной записи полутонных фотошаблонов с пространственным разрешением до  $2000 \text{ мм}^{-1}$  и диапазоном изменения коэффициента пропускания на длине волны 436 нм от 0,5-2% до 10-20%.

5. Проведены количественные исследования поведения LDW-стекол при различных режимах лазерной записи: измерены зависимости коэффициента пропускания от мощности пучка при различных скоростях сканирования, исследовано пространственное разрешение и его связь с изменением коэффициента пропускания. Показано, что оптимальный диапазон изменения коэффициента пропускания на длине волны 436 нм лежит в диапазоне от 5-10% до 60%.

6. Обнаружен и исследован эффект оконтуривания дифракционных зон на полутонных фотошаблонах, возникающий из-за падения поглощения излучения лазерного пучка при записи с частичным перекрытием соседних областей экспонирования на материалах с лазерно-индуцированным уменьшением коэффициента поглощения. Показано, что обратное воздействие изменяемого

поглощения проявляется также в виде различия в характеристических кривых материала от градиента мощности сканируемого лазерного пучка. Предложены и экспериментально апробированы методы уменьшения оконтуривания при записи полутоновых фотошаблонов.

7. Предложен и исследован метод увеличения дифракционной эффективности многоуровневых РОЭ, основанный на приграничной оптимизации локального распределения экспозиции при формировании их рельефа на фоторезисте. Для прямой лазерной записи метод реализуется путем встраивания ступенчатой передаточной функции в расчетные данные для экспонирования вдоль границ дифракционных зон на участках с шириной, не превышающей удвоенный диаметр записывающего пучка, и оптимизацией от 2 до 6 параметров этой функции. Показано, что приграничная оптимизация для полутоновой растровой фотолитографии, использующая ОФРТ для моделирования процесса синтеза РОЭ и вариацию структуры фотошаблона для локального перераспределения экспозиции, позволяет увеличить дифракционную эффективность до 20% для периодов дифракционных зон до 6 мкм.

8. Исследован метод синтеза РОЭ, основанный на использовании устойчивой к ионному травлению поверхностной контурной маски, сформированной под пленкой фоторезиста вдоль границ дифракционных зон, с линиями, ширина которых увеличивается с ростом периода дифракционных зон от 0,9 до 1,8 диаметра записывающего пучка для получения максимальной дифракционной эффективности в первом порядке. По результатам численного моделирования определены допустимые погрешности совмещения маски с границами зон и глубины ионного травления через нее. Показано, что увеличение дифракционной эффективности РОЭ может достигать 18-28 % по сравнению с известными методами оптимизации микрорельефа.

9. Предложен, исследован и апробирован практически не зависящий от типа профилометра метод контроля многоуровневого микрорельефа РОЭ по аппроксимированной глубине, которая определяется путем экстраполяции до границ дифракционных зон функции, аппроксимирующей форму зон между их обратными скатами, и вычислением перепада экстраполированного профиля на границе двух соседних зон или между границами одной зоны. Предложен и обоснован метод характеристики ДОЭ на основе расчета дифракционной эффективности с использованием ОФРТ.

10. Разработан, исследован и апробирован на практике метод изготовления кварцевых дифракционных матриц, основанный на лазерной литографической технологии и позволяющий серийно тиражировать интраокулярные дифракционно-рефракционные бифокальные линзы, микрорельеф которых оптимизирован для

минимизации биологических отложений и получения одинаковой дифракционной эффективности в нулевом и первом порядках дифракции.

11. Разработан и исследован метод изготовления конформальных корректоров для исправления искажений волнового фронта излучения мощных твердотельных лазеров, основанный на лазерной записи полутонного фотошаблона с угловым растриванием, фотолитографии с зазором и реактивным ионным травлением. Синтезированные корректоры обеспечивают компенсацию статических искажений волнового фронта излучения, прошедшего через активный элемент, до уровня не более чем  $\lambda/10$  (СКО).

Разработаны лазерные литографические системы и методы для синтеза РОЭ, которые внедрены на ряде российских научно-образовательных и научно-производственных организаций. Это создало основу для разработки и освоения различными отраслями российской промышленности высокотехнологичной продукции с использованием новой элементной базы.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

##### Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. Корольков В.П., Насыров Р.К., Полещук А.Г., Арапов Ю.Д., Иванов А.Ф.: Конформальные оптические элементы для коррекции искажений волнового фронта в YAG:Nd активных элементах// Квантовая электроника. – 2013. –Т. 43, № 2.– С. 117-121.
2. Chugui Yu., Verkhoglyad A., Poleshchuk A., Korolkov V., Sysoev E., Zavyalov P. 3D Optical Measuring Systems and Laser Technologies for Scientific and Industrial Applications// Measurement science review.–Vol. 13, No. 6.–2013.–P. 322-328.
3. Анцыгин В. Д., Конченко А. С., Корольков В. П., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И. Терагерцовый микроастровый эмиттер на основе поперечного эффекта Дембера// Автометрия2013. – Т. 49, № 2. – С. 92-97.
4. Резникова Е.Ф., Гольденберг Б.Г., Кондратьев В.И., Кулипанов Г.Н., Корольков В.П., Насыров Р.К. ЛИГА-технология для синтеза дифракционных преломляющих интраокулярных линз// Известия РАН. Серия физическая.–2013.–Т. 77, № 2.– С. 131-135.
5. Корольков В.П., Конченко А.С. Спектрофотометрический метод измерения глубины отражательных калибровочных решеток// Автометрия. – 2012.– Т. 48, №2.– С.120-128.
6. Корольков В.П., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Самсонов Р.В., Маслий А.И., Медведев А.Ж., Гольденберг Б.Г. Фемтосекундное лазерное наноструктурирование поверхности Ni/Cu-фольг// Квантовая электроника. – 2011.– Т.41, №4 .– С.387–392.

7. Вейко В.П., Корольков В.П., Полещук А.Г., Саметов А.Р., Шахно Е.А., Ярчук М.В. Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур// Квантовая электроника. –2011.–Т. 41, № 7. –С. 631–636.
8. Гольденберг Б.Г., Абрамский А.Ю., Зелинский А.Г., Маслий А.И., Максимовский Е.А., Кондратьев В.И., Корольков В.П., Купер К. Э., Петрова Е.В., Пиндюрин В.Ф. Особенности изготовления шаблонов для глубокой рентгеновской технологии в сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. –2011.– № 2.–С. 61–68.
9. Полещук А.Г., Кутанов А.А., Бессмельцев В.П., Корольков В.П., Шиманский Р.В., Малышев А.И., Маточкин А.Е., Голошевский Н.В., Макаров К.В., Макаров В.П., Снимщиков И.А., Сыдык уулу Н. Микроструктурирование оптических поверхностей: технология и устройство прямой лазерной записи дифракционных структур// Автометрия. – 2010.–Т.46, №2.–С. 86-96.
10. Абрамский А.Ю., Гольденберг Б.Г., Зелинский А.Г., Кондратьев В.И., Корольков В.П., Коронкевич В.П., Маслий А.И., Медведев. А.Ж. Разработка химико-гальванических процессов для литографического производства трехмерных микроструктур// Гальванотехника и обработка поверхности. – 2010. –Том XVIII, №2. –С. 11-18.
11. Корольков В.П., Остапенко С.В. Характеризация профилограмм кусочно-непрерывного дифракционного микрорельефа// Оптический журнал. – 2009.– Т. 76, № 7.– С. 34-41.
12. Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О. Н., Корольков В. П., Лавринова Л.Н., Насыров Р.К., Полещук А.Г., Черкашин В.В. Датчик Шэка – Гартмана на основе раstra низкоапертурных внеосевых дифракционных линз// Автометрия. – 2009.– Т. 45, № 2.– С. 88-98.
13. Ленкова Г.А., Корольков В.П., Коронкевич В.П., Насыров Р.К., Мызник М.М., Гутман А.С., Исаков И.А., Треушников В.М. Дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы // Автометрия. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 75-88.
14. Коронкевич В.П., Ленкова Г.А., Корольков В.П., Полещук А.Г., Исаков И.А., Гутман А.С. Новое поколение бифокальных дифракционно-рефракционных интраокулярных линз// Компьютерная оптика. —2008. —Том 32, №1. —С. 50-58.
15. Исаков И.А., Корольков В.П., Коронкевич В.П., Ленкова Г.А. Клинико-экспериментальное исследование бифокальных дифракционно-рефракционных ИОЛ нового поколения // Вестник новых медицинских технологий. – 2008. – Т. XV, № 4. – С. 151–154.

16. Коронкевич В.П., Ленкова Г.А., Корольков В.П., Исаков И.А. Бифокальные дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы// Оптический журнал. — 2007.—Т.74, №12. —С.34-39.
17. Исаков И.А., Коронкевич В.П., Ленкова Г.А., Корольков В.П. Отечественная бифокальная дифракционно-рефракционная ИОЛ: конструкция, оптические свойства // Вестник ОГУ (Вестник Оренбургского государственного университета). — 2007. — № S12 (№78). — С. 85–88.
18. Korolkov V.P., Nasyrov R.K., Shimansky R.V. Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements// Applied Optics. — 2006. —Vol. 45, № 1. —Р.53-62.
19. Корольков В.П., Насыров Р.К., Полещук А.Г., Прус К., Райхельт С. Методы сертификации дифракционных оптических элементов для контроля асферической оптики// Автометрия. —2005. — Т. 41, № 6. —С. 115-125.
20. Korolkov V., Shimansky R., Cherkashin V., Denk D. Computer controlling of writing beam in laser microfabrication of diffractive optics// Компьютерная оптика. — 2003. —Вып. 25. —С. 79-88.
21. Корольков В.П. Измерение и коррекция траектории движения лазерного пучка в круговых записывающих системах// Автометрия. —2003. —Т. 39, № 6. — С. 13-25.
22. Корольков В.П., Полещук А.Г., Черкашин В. В., Райхельт С., Бёдж. Дж. Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов// Автометрия. —2002. —№3. — С. 3-19
23. Корольков В.П., Полещук А.Г., Коронкевич В.П., Седухин А.Г. Применение дифракционной оптики в измерительной технике// Компьютерная оптика. —2001. — Вып. 22. — С. 86-95.
24. Korolkov V.P., Pruss C., Reichelt S., Tiziani H. J. Preliminary results in investigation of diffractive high-efficiency objectives// Компьютерная оптика. — 2002. —Вып. 22. —С. 33-39
25. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure// Applied Optics.- 1999.—V.38, №8.—Р.1295-1301.
26. Корольков В.П., Малышев А.И., Никитин В.Г., Полещук А.Г., Харисов А.А., Черкашин В.В., Ву Ч. Полутоновые фотошаблоны на основе LDW-стекол// Автометрия. —1998.—№6.—С.27-37.
27. Коронкевич В.П., Корольков В.П., Полещук А.Г. Лазерные технологии в дифракционной оптике// Автометрия. —1998.—№ 6.—С.5-26.
28. Коронкевич В.П., Корольков В.П., Полещук А.Г., Харисов А.А., Черкашин В.В. Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат - анализ погрешностей изготовления и их измерение// Автометрия. —1997.— №6.— С.42-56.

29. Gotchiyaev V.Z., Korolkov V.P., Sokolov A.P., Chernukhin V.P. High resolution optical recording on a-Si films// Journal of Non-Crystalline Solids. — 1991.—Vol. 137&138.—P.1297-1300.
30. Корольков В.П., Чернухин В.П. Оптическая запись на пленках аморфного кремния с субмикронным разрешением// Журнал технической физики. -1989.- Т. 59.- Вып. 6.- С.131-133.
31. Гочияев В.З., Корольков В.П., Соколов А.П., Чернухин В.П. Полутонная оптическая запись на пленках a-Si// Квантовая электроника. -1989.- Т.16.- №11.- С.2343-2348.
32. Коронкевич В.П., Корольков В.П., Ленкова Г.А, Михальцова И.А., Пальчикова И.Г., Полещук А.Г., Седухин А.Г., Чурин Е.Г., Юрлов Ю.И. Киноформы: технология, новые компоненты и оптические системы. Часть II// Автометрия. -1989.- № 4, С. 49-66.
33. Коронкевич В.П., Корольков В.П., Ленкова Г.А., Михальцова И.А., Пальчикова И.Г., Полещук А.Г., Седухин А.Г., Чурин Е.Г., Юрлов Ю.И. Киноформы: технология, новые компоненты и оптические системы. Часть I//Автометрия. — 1989. —№ 3. — С. 91-98.
34. Корольков В.П., Полещук А.Г. Управление оптическим излучением в прецизионных лазерных фотопостроителях// Автометрия. —1985. —№ 6. —С.51-61.

### **Список других работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **Глава в монографии**

35. Кирьянов В.П., Кирьянов В.П., Корольков В.П. Лазерные генераторы изображений с круговым сканированием: новые возможности традиционных направлений// Оптико-информационные измерительные и лазерные технологии и системы: Юбилейный сборник избранных трудов КТИ НП СО РАН // Академическое изд-во «Гео». —С.184-216.

#### **Сборники научных статей:**

36. Шиманский Р.В., Полещук А.Г., Корольков В.П., Черкашин В.В., Харисов А.А. Оптимизация метода прямой записи при изготовлении ДОЭ с непрерывным профилем// Компьютерная оптика. —2000.—Вып. 20.— С. 80-83.
37. Корольков В.П., Малышев А.И., Никитин В.Г., Полещук А.Г., Харисов А.А., Черкашин В.В., Ву Ч. Изготовление высокоэффективных ДОЭ с помощью полутонных фотошаблонов на основе LDW-стекол // Компьютерная оптика. — 1998.—Вып. 18.—С. 43-51.

#### **Патенты и авторские свидетельства:**

38. Корольков В.П., Полещук А.Г. Устройство модуляции светового потока с шумоподавлением. Авторское свидетельство №1034506, от 08.04.1983. // Бюллетень: Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. —1983.

39. Корольков В.П., Полещук А.Г., Чурин Е.Г. Способ изготовления дифракционных оптических элементов. Авторское свидетельство СССР №1280560, от 01.09.1986. // Бюллетень: Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. —1986.

40. Ленкова А.Г., Коронкевич В.П., Корольков В.П., Исаков И.А. Мультифокальная интраокулярная линза и способ ее изготовления // Патент РФ № 2303961, Опубл. 10.08.2007, Бюллетень 22.

**Сборники трудов конференций:**

41. Верхогляд А.Г., Корольков В.П., Кокарев С.А., Касторский Л.Б., Полещук А.Г. Двухканальная круговая лазерная записывающая система для изготовления дифракционных и микрооптических элементов // Сборник трудов 10-й Международной конференции "ГолоЭкспо-2013». —Москва, 2013. —С. 182-187.

42. Korolkov V.P., Nasyrov R.K., Poleshchuk A.G., Malyshev A.I., Sametov A.R., Arapov Yu. D., Ivanov A.F. Large aperture conformal wavefront correctors for high-power solid-state lasers with YAG:Nd active elements// International Symposium ICONO//LAT-20132013.— Moscow, Russia, 2013. — LFH25.

43. Корольков В.П. Применение контурной маски для повышения дифракционной эффективности ДОО с кусочно-непрерывным рельефом// Сборник материалов IX Международного научного конгресса "Интерэкспо гео-сибирь-2013». — Том Сибоптика-2013. — Новосибирск, 2013. — С. 20-24.

44. Korolkov V.P., Konchenko A.S., Poleshchuk A.G. Application of fiber spectrometers for etch depth measurement of binary computer-generated holograms// Proc. SPIE. — 2013. — Vol.8759. — 875959.

45. Nasyrov R.K., Arapov Yu.D., Korolkov V.P., Poleshchuk A.G. Conformal optical elements for wavefront distortion correction in YAG:Nd active elements// Book of abstracts of XV International Conference "Laser Optics 2012".—St. Petersburg, Russia, 2012.— Code: WeR4-04.

46. Korolkov V.P., Nasyrov R.K., Sametov A.R. and Suhih S.A. Optimization of half-tone technology for diffractive microlens fabrication// Proc. SPIE. — 2011.—Vol. 7957.— 795710.

47. Корольков В.П., Насыров Р.К., Гутман А.С., Саметов А.Р., Сухих С.А. Оптимизация полутоновой технологии изготовления дифракционных элементов с кусочно-непрерывным рельефом// Материалы 7-ой Международной Конференции «ГОЛОЭКСПО – 2010». — Москва, 2010. —С. 196-202.

48. Korolkov V.P., Konchenko A.S., Nasyrov R.K., Spectrophotometric certification of calibration gratings // Proceedings of the IASTED Conference on Automation, Control, and Information Technology: Optical Information Technology.—Novosibirsk, 2010. — P. 275-278.

49. Poleshchuk A.G., Korolkov V.P. Trends in direct laser writing methods for fabrication of diffractive micro- and nanostructures // International conference “Fundamentals of laser Assisted Micro-and Nanotechnologies” (FLAMN-10).—St. Petersburg, 2010. — P. 71-72.
50. Korolkov V.P., Poleshchuk A.G., Veiko V.P., Yarchuk M.V., Malyshev A.I., Sametov A.R., Suhii S.A., Goldenberg B.G. Study of microstructure topography and hardness evolution at direct laser writing on chrome films// “Fundamentals of laser Assisted Micro-and Nanotechnologies” (FLAMN-10).—St. Petersburg, 2010.—P. 90-91.
51. Gutman A. S., Shchesnyuk I.V., Korolkov V. P. Optical testing of bifocal diffractive-refractive intraocular lenses using Shack-Hartmann wavefront sensor//Proc. SPIE .— 2010.—Vol. 7718.— 77181P.
52. Korolkov V.P., Ostapenko S.V., Nasyrov R.K., Gutman A.S., Sametov A.R. Unification of approaches to optimization and metrological characterization of continuous-relief diffractive optical elements// Proc. SPIE. — 2010.—Vol. 7718. — 77180S.
53. Pindyurin V.F., Goldenberg B.G., Petrova E.V., Ancharova U.V., Eliseev V. S., Korolkov V.P., Nasyrov R.K. Dynamic X-ray lithography for blazed diffractive optics fabrication// Proc. SPIE.— 2008.—Vol. 7102.— 710208.
54. Korolkov V.P.; Ostapenko S.V.; Shimansky R.V. Profilometric characterization of DOEs with continuous microrelief// Proc. SPIE. — 2008.—Vol. 7102. — 710209.
55. Корольков В.П., Пыхтин А.В., Черкашин В.В. Проектирование и запись оригиналов защитных голограмм с псевдообъемными элементами на установке CLWS-300IAE// Сборник трудов и официальные материалы конференции «Голография в России и за рубежом. Наука и практика». — Санкт-Петербург, 2008. — С. 171-175.
56. Koronkevich V.P., Korolkov V.P., Lenkova G.A., Treushnikov V.M., Viktorova E. A., Iskakov I.A., Gutman A.S. Phototechnologies for fabrication of bifocal intraocular lenses// Proc. SPIE. — 2007.—6734, 67340Z.
57. Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Shimansky R. V. Optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements// Proc. SPIE.— 2007.— Vol.6732.— 67320P.
58. Korolkov V.P., Poleshchuk A. G. Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements// Proc. SPIE. — 2007. — Vol.6732. — 67320X.
59. Полещук А.Г., Корольков В.П. Методы изготовления и контроля дифракционных оптических элементов// Сборник трудов 4-го международного форума “Голография ЭКСПО -2007”. — Москва,2007. — С. 11-14.
60. Корольков В.П., Остапенко С.В., Шиманский Р.В., Денк Д.Э. Оптические микропрофилометры для контроля дифракционного микро рельефа// Сборник трудов

- 4-го международного форума “Голография ЭКСПО-2007”. — Москва, 2007. — С. 89-92.
61. Корольков В.П., Остапенко С.В., Шиманский Р.В. Методы обработки профилограмм и интерферограмм кусочно-непрерывного дифракционного микрорельефа// Сборник трудов 4-го международного форума “Голография ЭКСПО-2007”. — Москва, 2007. —С. 93-95.
62. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Корольков В. П., Исаков И. А. Бифокальные дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы// Сборник трудов 7-й Международной конференции "Прикладная оптика-2006" – Москва, 2006. – Т. 1.—С. 278–282.
63. Корольков В.П., Коронкевич В.П., Полещук А.Г. Лазерные технологии в дифракционной оптике// Второй международный форум Голография–экспо-2005. — Москва, 2005. — С. 64.
64. Korolkov V. P., Pruss C., Reichelt S., Osten W., Tiziani H. J.. Performance improvement of CGHs for optical testing// Proc. SPIE. — 2003. — Vol. 5144. — P. 460-471.
65. Korolkov V.P., Poleshchuk A.G., Koronkevich V.P., Sedukhin A.G. Application of diffractive optical elements in laser metrology// Proc. SPIE.— 2002.— Vol.4900.— P. 841-852.
66. Korolkov V.P., Pruss C., Reichelt S., Tiziani H. J. Metrological features of diffractive high-efficiency objectives for laser interferometry// Proc. SPIE.— 2002.— Vol.4900.— P. 873-884.
67. Korolkov V. P., Shimansky R., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Kharissov A.A., Denk D.E. Requirements and approaches to adapting laser writers for fabrication of gray-scale masks// Proc. SPIE.— 2001.— Vol.4440.— P. 256-267.
68. Korolkov V. P., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Reichelt S., Burge J.H. Polar-coordinate laser writing systems: error analysis of fabricated DOEs// Proc. SPIE.— 2001.— Vol.4440.— P.161-172.
69. Korolkov V. P., Malyshev A.I., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Tiziani, H.J., Pruss C., Schoder T., Westhauser J., Wu C. Fabrication of gray-scale masks and diffractive optical elements with LDW-glass// Proc. SPIE.— 2001.— Vol.4440.— P.73-84.
70. Korolkov V.P., Malyshev A.I., Nikitin V.G., Cherkashin V.V., Poleshchuk A.G., Kharissov A.A. Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs// Proc. SPIE.—1999.—Vol.3633.— P.129-138.
71. Koronkevich V.P., Korolkov V.P., Malyshev A.I., Nikitin V.G. New fabrication method for diffractive optical elements with deep phase relief// Proc. SPIE. — 1997.— Vol.3010. — P.180-191.

72. Cherkashin V.V., Churin E.G., Korol'kov V.P., Koronkevich V.P., Kharissov A.A., Poleshchuk A.G. Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films// Proc. SPIE. — 1997. — Vol. 3010. — P. 168-179.
73. Koronkevich V.P., Kiryanov V.P., Korol'kov V.P., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Kharissov A.A. Fabrication of diffractive optical elements by laser writing with circular scanning // Proc. SPIE.—1995. — Vol.2363. — P.290-297.
74. Korol'kov V.P., Sokolov A.P., Semakov V.S. Optical recording materials for producing diffraction elements// Proc. SPIE. —1989.—Vol.1183. — P.672-674.
75. Gotchiyaev V.Z., Korol'kov V.P., Sokolov A.P. Optical recording on amorphous silicon films: optical and structural changes, spatial resolution// Proc. III Intern. Symp. on Modern Optics. — Budapest, 1988. — Vol. II. — P.446-449.

### **Список цитируемых работ:**

- 
1. Слюсарев Г.Г. Оптические системы с фазовыми слоями// ДАН СССР. —1957. Т. 113, № 4. — С. 780-782.
  2. Денисюк Ю.Н., Соскин С.И. Голографическая коррекция деформационных aberrаций главного зеркала телескопа // Опт. и спектр. — 1971. — Т. 31, вып. 6. — С. 992-999.
  3. Тудоровский А.И. Объектив с фазовой пластинкой// Оптика и спектроскопия. — 1959. —Т. VI. — Вып. 2. — с.198-210.
  4. Гусарова Н.И., Лушников Д.С., Маркин В.В., Одинокоев С.Б. Голограммные зеркала окулярной системы очков ночного видения// Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2010.— № 4.— С. 39-49.
  5. Сисакян И.Н., Шорин В.П., Сойфер В.А., Мордасов В.И., Попов В.В. Технологические возможности применения фокусаторов при лазерной обработке материалов// Компьютерная оптика. — 1988.—Вып. 3.—С94.
  6. Herzig H.P., Ehbets P., Teijido J.M., Weible K.J. and Heimbeck H.-J. Diffractive optical elements for space communication terminals// Proc. SPIE.—1994.— Vol. 2210.— P.104-111.
  7. Лукин А.В., Мустафин К.С. Голографические методы контроля асферических поверхностей// Оптико-механическая промышленность. —1979.—№ 4.— С.53-59
  8. Коронкевич В.П., Полещук А.Г., Седухин А.Г., Ленкова Г.А. Лазерные интерферометрические и дифракционные системы// Компьютерная Оптика. — 2010.—Т.34, № 1.—С. 4-23.
  9. Волков А.В., Казанский Н.Л., Успенцев Г.В. Экспериментальное исследование светотехнических устройств с ДОЭ// Компьютерная оптика. —1999.—Вып.19 .— С.137-142.

- 
10. Василевский А.С., Лушников Д.С., Маркин В.В., Одинокоев С.Б. Математическое моделирование голограммного светоформирующего диффузора// Мир голографии. —2013.—Т.1, №1.—С.43-58.
  11. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Исаков И. А., Малышев А. И., Попков В. А., Юрлов Ю. И. Бифокальная дифракционно-рефракционная интраокулярная линза//Автометрия.—1997.—№6.—С.26-41.
  12. Данилов В.А., Попов В.В., Прохоров АМ., Сагателян И.Н., Сисакян Е.В., Сойфер В.А., Степанов В.В. Оптические элементы, фокусирующие когерентное излучение в произвольную фокальную линию. М.: ФИАН. — 1983.
  13. Ган М.А., Первеев А.Ф. Киноформная оптика - свойства и проблемы рационального использования // Известия АН СССР. Сер. Физическая. — 1988. — Т.52, № 2. — С.210-216.
  14. Грейсхух Г. И., Ефименко И. М., Степанов С. А., Оптика градиентных и дифракционных элементов. М.: Радио и связь. — 1990.
  15. Гончарский А.В., Попов В.В., Степанов В.В. Введение в компьютерную оптику. М.: МГУ. — 1991.
  16. Волков А.В., Головашкин Д.Л., Досколович Л.Д., Казанский Н.Л., Котляр В.В., Павельев В.С., Скиданов Р.В., Сойфер В.А., Соловьев В.С., Успенъев Г.В., Харитонов С.И., Хонина С.Н. Методы компьютерной оптики// Под.ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит. — 2000.
  17. Гуццо Ю.П. Фазовая рельефография. —Москва, 1974—Энергия. —168 с.
  18. Изготовление голографических оптических элементов методами фотолитографии и ионного травления / Бобров С.Т., Котлецов Б.Н., Минаков В.И., Туркевич Ю.Г. // Оптическая голография и ее применение в промышленности. - Л., 1976. — С.31-32.
  19. Спектр Б.И. Об одном методе синтеза фазовой структуры киноформов// Автометрия. —1985. — №6. — С.34.
  20. Полещук А.Г. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутонной и фоторастровой технологий//Автометрия. — 1991.—№ 6.—С.54-61.
  21. 3D лазерные информационные технологии //Ответственный редактор Твердохлеб П.Е. — Новосибирск, 2003. —550 С.
  22. Goltsov W. and Liu S. Polar Coordinate laser writer for binary optics fabrication// Proc. SPIE.—1990. — Vol.1211.—P. 137.
  23. Bowen J. P., Michaels R. L., Blough C. G. Generation of large-diameter diffractive elements with laser pattern generation// Appl. Optics.—1997.—Vol. 36, №34.— P.8970-8975.

- 
24. Kim D.-I., Rhee H.-G., Kim G.-H. Performance evaluation of direct laser lithographic system for rotationally symmetric diffractive optical elements// *Proc. SPIE.*—2012.— Vol. 8249. — 82491C.
  25. Metev S. M. and Veiko V. P. “Laser-assisted microtechnology,” 2nd, Updated Edition. Berlin, New York: Springer-Verlag. — 1998.
  26. Полещук А. Г. Дифракционные фильтры с переменным пропусканием // *Автоматрия.* —1997.— № 5.— С. 22-30.
  27. С.-К. Wu, “High energy beam sensitive glasses”, Patent USA N 5285517, 1994.
  - 28 Hessler T., Rossi M.,Kunz R.E, and Gale M.T. Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements// *Appl. Optics.*— 1998.—Vol. 37, №19.— P.4069-4079.
  29. Ogusu M., Iwasaki Y. Method of manufacturing diffractive optical element, Patent USA N 6,930,834, August 16, 2005.
  30. Mills J.P. Conformal optics: theory and practice//*Proc. SPIE.*— 2001.—Vol.4442.— P. 101-107.