

На правах рукописи



Белоусов Дмитрий Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ЛОКАЛЬНОГО
КОНТРОЛЯ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И
АМПЛИТУДНЫХ РЕШЁТОК**

01.04.05 – Оптика

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Новосибирск 2020 г.

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

Научный руководитель: доктор технических наук,
заместитель директора по научной работе
ИАиЭ СО РАН
Корольков Виктор Павлович

Официальные оппоненты: **Одинокое Сергей Борисович,**
доктор технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)»,
профессор кафедры «Лазерные и оптико-
электронные системы»

Завьялов Петр Сергеевич,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Конструкторско-
технологический институт научного
приборостроения Сибирского
отделения Российской академии наук,
директор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский национальный
исследовательский университет имени академика
С.П. Королева»

Защита состоится «21» мая 2021 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 003.005.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН и на сайте: <https://www.iae.nsk.su/ru/dissertation-council>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 003.005.02,
доктор физико-математических наук



Ильичев Л. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящее время дифракционные оптические элементы (ДОЭ) благодаря своим широким функциональным возможностям в реализации волновых фронтов и энергетических преобразований световых пучков находят широкое применение в различных областях науки и техники. Рабочая структура ДОЭ может быть амплитудной, фазовой или амплитудно-фазовой. Элементы с поверхностной фазовой структурой микрорельефа можно объединить в один общий класс рельефно-фазовых оптических элементов (РОЭ). К РОЭ также можно отнести и конформальные оптические элементы (рефракционные элементы, функция пропускания которых выбирается, исходя из заданных внешних неоптических условий, а не из набора стандартных оптических поверхностей) [1], применяемые в качестве статических корректоров волнового фронта. Следует отметить, что поверхностная структура из поглощающего (отражающего) материала с малой глубиной микрорельефа, сформированная на подложке, может служить в качестве маски, формирующей рабочую структуру амплитудных ДОЭ. На сегодняшний день существует множество методов изготовления РОЭ. Наиболее распространёнными в производственной практике являются: фотолитографическая технология, сканирующая одно- или многоточечная запись сфокусированным лазерным пучком, интерференционно-голографический метод и технология алмазного точения. В последнее время большое внимание уделяется исследованию и поиску приложений термохимических лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИПС), которые формируются на поверхности модифицируемого материала под воздействием импульсного лазерного пучка с низкоапертурной фокусировкой.

Микрорельеф РОЭ, как правило, имеет сложную структуру, и его отклонение от расчётных значений приводит к энергетическим потерям и искажению формируемого волнового фронта. В связи с этим, важной задачей является осуществление контроля, как на промежуточных стадиях многоэтапного процесса изготовления, так и финишного контроля параметров изготовленных элементов. Методы контроля РОЭ можно условно разделить на четыре основные группы: определение соответствия между измеренной и расчетной функцией преобразования светового пучка (искажение волнового фронта, интегральная эффективность преобразования распределения интенсивности и т.д.), непосредственное измерение параметров микрорельефа исследуемого элемента (таких, как глубина, форма, период и угловая ориентация структур), анализ тестовых структур, изготовленных на подложке вместе с основной структурой элемента, и оптическая дифрактометрия, основанная на анализе дифракционной картины, полученной в результате локального освещения пробным пучком исследуемой структуры. Каждый из вышперечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки. Кроме того, каждый из них в отдельности не позволяет решить весь спектр задач контроля, возникающих при изготовлении данных элементов. Принимая во внимание многообразие способов формирования рабочей структуры РОЭ и широкие функциональные возможности данных элементов по преобразованию волновых фронтов и распределения интенсивности света, разработка методов и устройств, создаваемых для контроля определённых типов микрорельефа исследуемых элементов в рамках выбранного технологического процесса, является актуальной задачей.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является разработка методов и создание оптико-электронных систем для осуществления локального бесконтактного контроля рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток, в рамках выбранного технологического процесса их изготовления и с учётом особенностей микрорельефа исследуемых структур.

В соответствии с общей целью работы в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. исследование оптических схем видеорегистрации дифракционной картины, формирующейся на поверхности объёмных рассеивающих экранов в диапазонах угла дифракции не менее чем $\pm 80^\circ$ и азимутального угла 0° - 360° , с целью создания оптико-электронных устройств дифрактометрического контроля параметров ДОЭ, работающих в прошедшем или отражённом свете;
2. разработка дифрактометрического метода финишного контроля РОЭ, предназначенных для работы на пропускание в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолета, на основе использования лазерного источника видимого диапазона;
3. разработка метода поэтапного контроля РОЭ, изготавливаемых с использованием растровой полутонковой технологии;
4. разработка метода количественной оценки производительности записи (в зависимости от мощности и скорости сканирования лазерного записывающего пучка), дефектности, а также прямолинейности и параллельности дорожек, составляющих рельеф лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, по анализу их микроизображений.

Научная новизна

1. Впервые предложены и исследованы оптические схемы устройств дифрактометрического контроля, в которых при регистрации дифракционной картины от локальной области исследуемого элемента, освещённой пробным лазерным пучком, используется объёмный рассеивающий экран, установленный между ДОЭ и системой видеорегистрации. Проведено исследование схем с использованием объёмных рассеивающих экранов, имеющих форму полусферы и сегмента параболоида вращения, а также оптоволоконного рассеивающего экрана с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским, изготовленного на базе оптоволоконной шайбы.
2. Впервые создана автоматическая оптико-электронная система дифрактометрического контроля параметров ДОЭ с периодом структуры в диапазоне 0.45–6.47 мкм, в которой при регистрации дифракционной картины используется полусферический рассеивающий экран, установленный между исследуемым элементом, и четырьмя видеокамерами, расположенными вокруг экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси его симметрии. В разработанном устройстве используется источник излучения с оптоволоконным выходом, объединяющий три лазерных источника с длинами волн 447 нм, 532 нм и 643 нм, а регистрация дифракционной картины осуществляется в отражённом свете. Диапазон периодов элементов, контролируемых на созданном устройстве, составляет 0.45–4.5 мкм для длины волны 447 нм, 0.54–5.36 мкм для длины волны 532 нм и 0.65–6.47 мкм для длины волны 643 нм.

3. Впервые создан дифрактометрический стенд, в котором при регистрации дифракционной картины в прошедшем свете используется оптоволоконный рассеивающий экран с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским, изготовленный на базе оптоволоконной шайбы. Стенд создан на базе инвертированного оптического микроскопа и позволяет объединить визуальный контроль элементов в отражённом свете и дифрактометрический контроль на длине волны пробного пучка 405 нм в прошедшем свете для элементов с диапазоном изменения периодов 0.45–1 мкм.
4. Впервые для термохимических лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, сформированных на плёнках хрома и гафния, получены зависимости количественных характеристик таких параметров как относительная площадь дефектов исследуемой структуры, прямолинейность и параллельность дорожек, формирующих ее, а также производительность записи, в зависимости от мощности и скорости сканирования записывающего астигматически сфокусированного гауссова пучка.

Практическая значимость работы

1. Предложенные и исследованные в работе схемы видеорегистрации дифракционной картины в широком угловом диапазоне с использованием объёмных рассеивающих экранов позволяют создавать автоматические системы дифрактометрического контроля ДОЭ с высокой скоростью измерения параметров элементов в локально контролируемой области и при этом с широким диапазоном изменения периодов исследуемых структур: от сотен нанометров до нескольких десятков микрометров.
2. Предложенный дифрактометрический метод, основанный на анализе дифракционной эффективности тестовых линейных решёток с кусочно-непрерывным рельефом в отражённом свете, даёт возможность использовать общедоступные лазерные источники видимого диапазона для контроля РОЭ, рассчитанных для работы в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолета на пропускание, что значительно упрощает процедуру контроля данных элементов и тем самым снижает затраты на их изготовление.
3. Разработанный метод, основанный на формировании и анализе тестовых структур с синусоидальной формой профиля, позволяет осуществлять контроль на всех технологических этапах растровой полутонковой фотолитографии при изготовлении РОЭ, что даёт возможность выявлять источники и величины ошибок на промежуточных стадиях изготовления элементов и снизить затраты на их изготовление.
4. Разработанный метод количественной оценки характеристик лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур по анализу их микроизображений имеет практическое значение для исследования физических процессов, которые приводят к формированию периодической структуры на поверхности материала при его обработке лазерным излучением. Кроме того, полученные с помощью разработанного метода данные позволяют определять оптимальные параметры записи ЛИППС.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенные схемы локального дифрактометрического контроля параметров ДОЭ с применением объёмного рассеивающего экрана, установленного между исследуемым ДОЭ и системой видеорегистрации, позволяют осуществлять

регистрацию дифракционной картины в диапазонах угла дифракции не менее чем $\pm 80^\circ$ и азимутального угла 0° – 360° . Использование рассеивающего экрана, выполненного в форме полусферы, позволяет осуществлять регистрацию дифракционной картины в заявленном угловом диапазоне с помощью четырёх видеокамер, расположенных вокруг экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси симметрии рассеивающего экрана. Использование рассеивающего экрана, выполненного в форме сегмента параболоида вращения, поверхность которого в угловом диапазоне $\pm 45^\circ$ от оси его симметрии приближена к форме полусферы, или регулярного оптоволоконного жгута с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским, позволяет регистрировать дифракционную картину в заявленном угловом диапазоне с помощью всего одной видеокамеры, расположенной вдоль оси симметрии рассеивающего экрана.

2. Использование встроенных тестовых линейных решёток с кусочно-непрерывным профилем микрорельефа и анализ дифракции при отражении от них пробного лазерного пучка видимого диапазона позволяет осуществлять контроль изготовления многоуровневых РОЭ, предназначенных для работы на пропускание в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолета. При этом длина волны пробного лазерного пучка и угол его падения на тестовые структуры выбираются из условия получения максимальной дифракционной эффективности в рабочем порядке дифракции на отражение для тестовой линейной решётки с расчётными параметрами микрорельефа. Влияние деструктивной интерференции на измерение интенсивности нулевого порядка дифракции устраняется путем установки исследуемого элемента через слой иммерсионной жидкости на опорную подложку (обратная сторона которой выполнена в виде клина или имеет рассеивающее покрытие), изготовленную из материала с таким же коэффициентом преломления, что и исследуемый элемент.
3. Разработанный метод поэтапного контроля РОЭ, изготавливаемых с применением технологии растровой полутонковой фотолитографии, основанный на формировании и анализе встроенных тестовых структур с синусоидальной формой профиля, позволяет осуществлять контроль функции пропускания растрового фотошаблона и формы рельефа в фоторезисте во всем динамическом диапазоне без искажения результатов измерения вблизи резких перепадов рельефа, свойственных решеткам с кусочно-непрерывным профилем.
4. Разработанный метод количественной оценки характеристик лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, основанный на анализе карт угловой ориентации пикселей на их микроизображениях, позволяет определять относительную площадь дефектов исследуемой структуры, прямолинейность и параллельность дорожек, формирующих ее, а также производительность записи, как функцию технологических параметров.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием многократно апробированных экспериментальных методов, применением известных и многократно проверенных программных пакетов для моделирования и обработки результатов, применением современных средств и методик измерения, сравнением полученных результатов с известными/эталонными значениями измеряемых параметров, а также публикацией основных результатов работы в

изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

Апробация

Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих научных мероприятиях: Международная научная конференция «СИБОПТИКА» (г. Новосибирск, в 2015–2018 гг.); XIV Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (г. Звенигород, 2017); XV Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (г. Нижний Новгород, 2018 г.); Восьмой Российский семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2018 г.); Международная конференция «Photonics Asia» (г. Пекин, Китай, 2018 г.); Международная конференция «Optics+Optoelectronics» (г. Прага, Чехия, 2019 г.); XVI Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (Санкт-Петербург, 2019 г.); Международная конференция «Photonics Asia» (г. Ханчжоу, Китай, 2019 г.); VI Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ) (г. Самара, 2020 г.); Девятый Международный семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2020 г.); Международная конференция «Photonics Asia» (Digital Forum, Китай, 2020 г.).

Личный вклад

Личный вклад автора состоит в выборе применяемых методов исследования, расчёте, проектировании, сборке и юстировке устройств, описанных в данной диссертационной работе, проведении экспериментальных и теоретических исследований, разработке программных кодов и алгоритмов для численного моделирования, обработке результатов, анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке научных публикаций по теме исследования, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту. Результаты, представленные в диссертации, получены автором лично.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 29 работ, в том числе 11 статей, 10 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus (из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ) и 18 тезисов и материалов докладов на научных конференциях международного и всероссийского уровня. Получен 1 патент на изобретение РФ (№ 2634372) и 1 акт о внедрении результатов диссертационной работы.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений, списка условных обозначений, трёх приложений, и списка цитируемой литературы, содержащего 229 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 178 страниц и включает 79 рисунков и 7 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, приведен краткий обзор литературы по проблеме, сформулированы цель работы, основные задачи, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, приведён список основных публикаций по теме работы, описана структура диссертации.

Первая глава диссертации посвящена исследованию предложенных оптических схем и созданных на их основе устройств, которые позволяют с помощью статично закреплённой видеокамеры (или нескольких видеокамер) осуществлять регистрацию дифракционной картины (ДК) в диапазонах угла дифракции не менее чем $\pm 80^\circ$ и азимутального угла ориентации 0° – 360° с целью дифрактометрического контроля параметров ДОЭ, работающих в прошедшем или отражённом свете.

В *разделе 1.1* приводится общая концепция предложенных оптических схем для устройств дифрактометрического контроля, которая основана на использовании объёмного рассеивающего экрана, расположенного между исследуемым элементом и системой видеорегистрации ДК. Использование объёмного рассеивающего экрана даёт возможность расположить его максимально близко к исследуемому элементу, избегая контакта экрана со структурой ДОЭ во время сканирования образца. Это позволяет обеспечить попадание на его поверхность дифракционных порядков (ДП) в широком диапазоне углов дифракции, а также обеспечить достаточное расстояние от исследуемого элемента до экрана для расхождения ДП друг относительно друга.

В *разделе 1.2* приводятся результаты исследования полусферического рассеивающего экрана, расположенного между исследуемым элементом и системой видеорегистрации ДК. В исследуемой схеме пробный лазерный пучок фокусируется на поверхности исследуемого ДОЭ в центре радиуса кривизны полусферического рассеивающего экрана. Полученные результаты показывают, что при регистрации ДК с поверхности такого экрана с помощью одной видеокамеры, расположенной вдоль оси его симметрии, при углах дифракции, превышающих величину 60° , разрешение системы резко ухудшается (рисунок 1). Это подтверждается и результатами экспериментальной апробации. На рисунок 2 представлена ДК от решётки с периодом 1.5 мкм, зарегистрированная видеокамерой с поверхности полусферического рассеивающего экрана. Здесь видно, что ДП, отклонившиеся на углы дифракции $\pm 57.9^\circ$, располагаются на рассеивающем экране достаточно близко к границе видимой области видеокамеры. Учитывая тот факт, что при определении центров ДП, близкий к линейному участок лежит в диапазоне углов дифракции $\sim \pm 45^\circ$ (рисунок 1), при использовании полусферического рассеивающего экрана для регистрации ДК в диапазонах угла дифракции не менее чем $\pm 80^\circ$ и азимутального угла 0° – 360° достаточным является использование четырёх видеокамер, расположенных вокруг экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси его симметрии.

В рамках данной работы предложенная схема устройства для регистрации и анализа

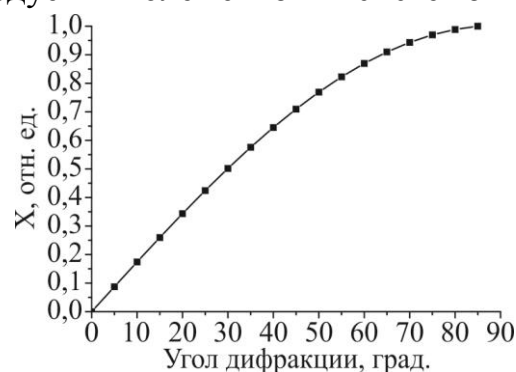


Рисунок 1 – Зависимость X-координат центров ДП на светочувствительной матрице видеокамеры (центры ДП лежат вдоль оси X) от угла дифракции при регистрации ДК с поверхности полусферического рассеивающего экрана (численное моделирование)

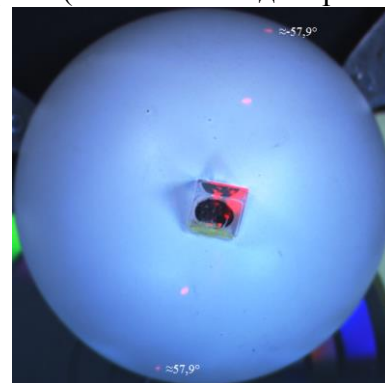
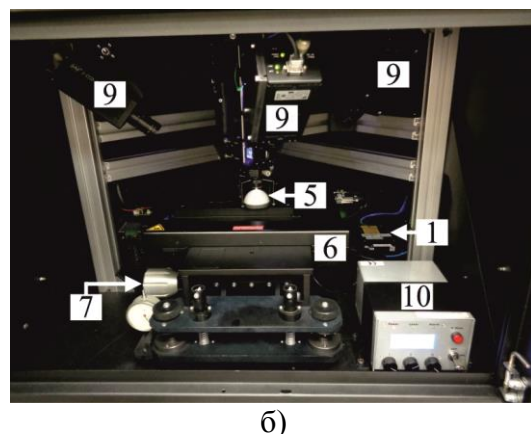
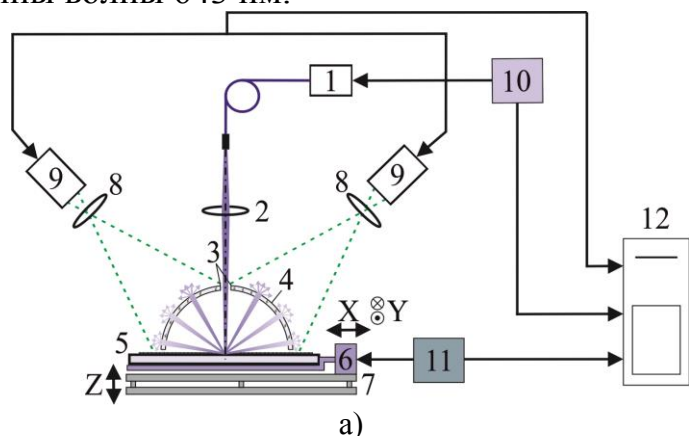


Рисунок 2 – Дифракционная картина в отражённом свете, зарегистрированная одной видеокамерой с поверхности полусферического рассеивающего экрана

пространственного распределения дифракционных порядков в отражённом свете была реализована (рисунок 3). В созданном устройстве используется источник излучения с оптоволоконным выходом, объединяющий три лазерных источника с длинами волн 447 нм, 532 нм и 643 нм. Диапазон сканирования исследуемого ДОО составляет 208×208 мм, максимальная толщина элемента 20 мм. Для регистрации дифракционной картины используются четыре ЗССД-видеокамеры, что позволяет осуществлять одновременную регистрацию ДК на всех длинах волн используемого источника излучения, а в процессе обработки разделять изображения, зарегистрированные синим, зелёным и красным каналами. Диапазон периодов элементов, контролируемых на созданном устройстве, составляет 0.45–4.5 мкм для длины волны 447 нм, 0.54–5.36 мкм для длины волны 532 нм и 0.65–6.47 мкм для длины волны 643 нм.



а) – упрощённая схема; б) – внешний вид

Рисунок 3 – Устройство дифрактометрического контроля ДОО в отражённом свете:

- 1 – источник излучения; 2 – фокусирующий объектив; 3 – входное отверстие;
 4 – полусферический рассеивающий экран; 5 – исследуемый элемент; 6 – XY-координатная система; 7 – Z-координатный столик; 8 – объектив; 9 – видеокамера; 10 – контролер лазерного модуля; 11 – контролер XY-координатной системы; 12 – управляющий компьютер

В разделе 1.3 приводятся результаты исследования возможности регистрации ДК в широком угловом диапазоне с помощью всего одной видеокамеры, установленной вдоль оси симметрии рассеивающего экрана, имеющего асферическую форму. Для исследования были выбраны две формы асферических рассеивающих экранов (рисунок 4). Экран №1 – сегмент полусферического экрана ограниченный угловым диапазоном $\pm 60^\circ$ от оси его симметрии. Экран №2 – сегмент параболоида вращения, поверхность которого в угловом диапазоне $\pm 45^\circ$ от оси его симметрии приближена к форме полусферы. Полученные результаты показали, что оба исследуемых рассеивающих экрана асферической формы позволяют регистрировать ДК в широком диапазоне углов дифракции с использованием всего одной видеокамеры. Однако при использовании параболического рассеивающего экрана при регистрации ДК с его поверхности наблюдается меньшее искажение поперечного размера ДП (рисунок 5).

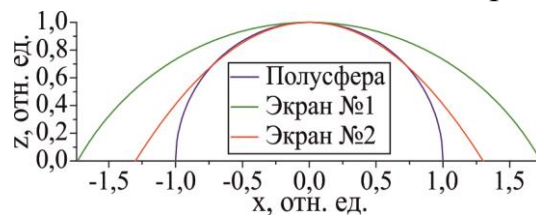


Рисунок 4 – 2D-проекции форм исследуемых рассеивающих экранов

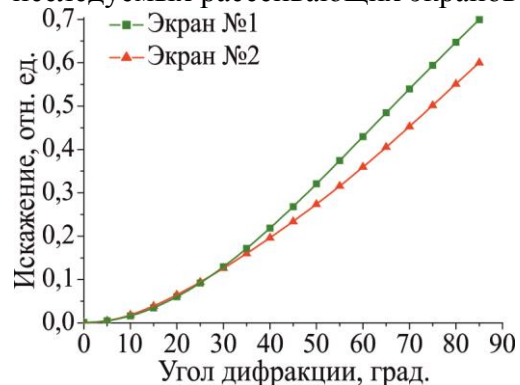


Рисунок 5 – Искажения поперечных размеров зарегистрированных ДП в зависимости от угла дифракции (численное моделирование)

Для апробации возможности регистрации дифракционной картины одной видеокамерой с поверхности асферического рассеивающего экрана, выполненного в форме сегмента параболоида вращения, в рамках данной работы был собран экспериментальный стенд, в котором регистрация ДК осуществляется в отражённом свете (длина волны пробного пучка 635 нм). На рисунке 6 представлен пример зарегистрированной дифракционной картины, полученной от эталонной решётки с периодом 5 мкм. Результаты исследования показали, что использование рассеивающего экрана, выполненного в форме сегмента параболоида вращения, позволяет осуществлять регистрацию дифракционной картины в прошедшем или отражённом от исследуемого элемента свете в диапазонах угла дифракции не менее чем $\pm 80^\circ$ и азимутального угла $0^\circ-360^\circ$ с помощью всего одной видеокамеры, установленной вдоль оси симметрии экрана.

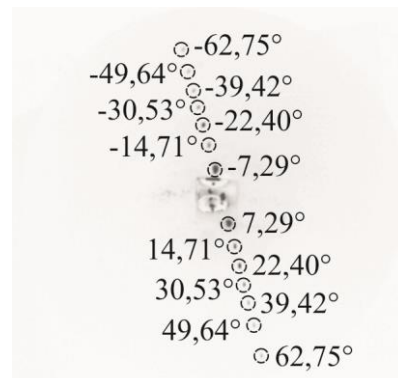


Рисунок 6 – Негатив зарегистрированной ДК для решётки с периодом 5 мкм

В разделе 1.4 приводятся результаты исследования оптоволоконного рассеивающего экрана (ОРЭ) с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским. Такой экран может быть изготовлен на базе регулярного оптоволоконного жгута, например, из оптоволоконного фокона или оптоволоконной шайбы. На рисунке 7 представлена схема регистрации ДК, как в прошедшем, так и в отражённом от исследуемого элемента свете с использованием двух ОРЭ. Пробный пучок фокусируется на исследуемом элементе в центре радиуса кривизны первого (сферически вогнутого) торца ОРЭ.

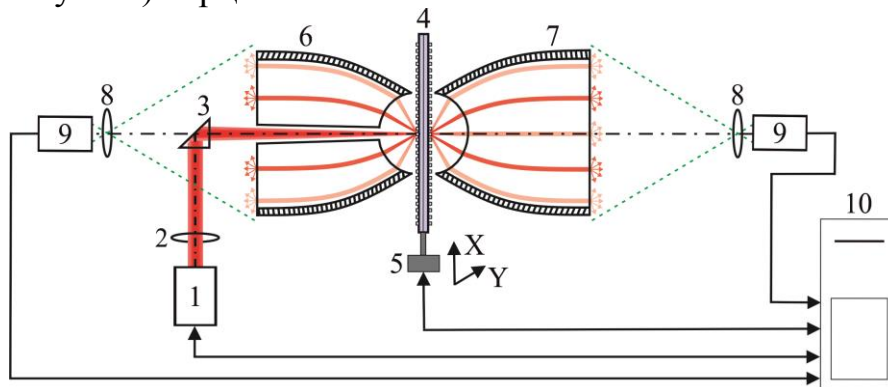


Рисунок 7 – Схема устройства для регистрации дифрагированного излучения, прошедшего и/или отражённого от периодической структуры ДОЭ с использованием ОРЭ: 1 – источник излучения; 2 – фокусирующая линза; 3 – поворотная призма; 4 – исследуемый элемент; 5 – XY-координатная система; 6 – оптоволоконный рассеивающий экран с отверстием; 7 – оптоволоконный рассеивающий экран; 8 – проекционный объектив; 9 – видеокамера; 10 – управляющий компьютер

Для апробации предложенной концепции устройства был создан экспериментальный стенд, реализующий схему регистрации дифрагированного излучения в прошедшем свете. Используемый в экспериментальном исследовании оптоволоконный рассеивающий экран был изготовлен на базе оптоволоконной шайбы высотой 19.5 мм. Радиус кривизны сферического сегмента выполненного в первом торце составляет ~ 18 мм. Торцы оптоволоконной шайбы имеют одинаковый диаметр, но их рабочая площадь из-за сферического сегмента, выполненного в первом торце ОРЭ, отличается. В связи с этим при переносе дифракционной картины с первого торца на второй возникают дисторсионные искажения. На рисунке 8 показано, что данные искажения влияют на точность

определения угла дифракции по анализу зарегистрированной дифракционной картины. С увеличением угла дифракции погрешность его определения увеличивается. Однако, несмотря на это, точность определения периода по измеренным данным углового распределения для дифракционных порядков, отклонившихся на больший угол, возрастает (рисунок 9). Это можно объяснить нелинейностью функции синуса в уравнении дифракционной решётки, которое используется для определения периода элемента (d) по данным измеренного углового распределения дифракционных порядков:

$$d = \frac{m\lambda}{\sin(a_m)}, \quad (1)$$

где m – номер дифракционного порядка, λ – длина волны пробного пучка, a_m – угол дифракции ДП с порядковым номером m . С увеличением угла дифракции, функция синуса менее чувствительна к ошибке его определения. Это и является причиной повышения точности определения периода по анализу углового распределения дифракционных порядков, отклонившихся на больший угол, несмотря на дисторсионные искажения зарегистрированной дифракционной картины.

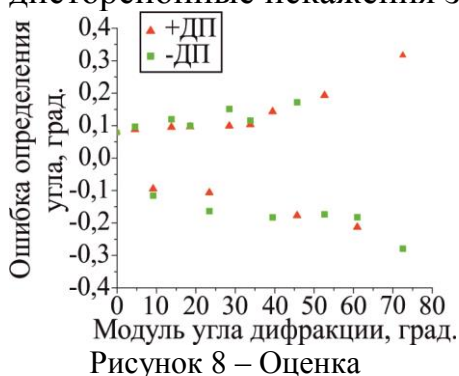


Рисунок 8 – Оценка

погрешности определения угла дифракции ДП

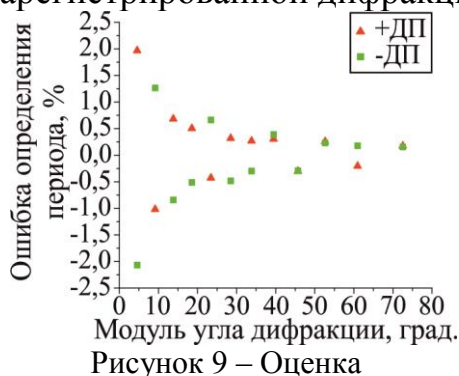


Рисунок 9 – Оценка

погрешности определения периода линейной решётки

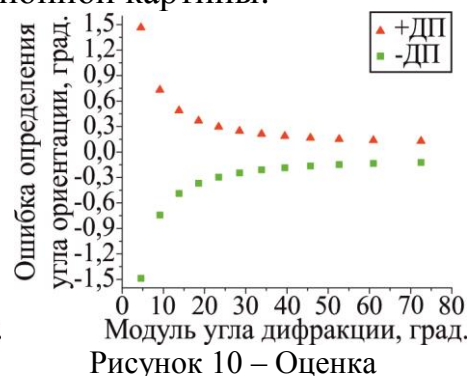


Рисунок 10 – Оценка

погрешности определения угловой ориентации решётки

Кроме того, анализ пространственного распределения дифракционных порядков, отклонившихся на больший угол, позволяет более точно определить и угловую ориентацию исследуемой решётки (рисунок 10). Это связано с тем, что при увеличении угла дифракции, увеличивается радиус окружности, на которой располагаются дифракционные порядки на поверхности ОРЭ (рисунок 11).

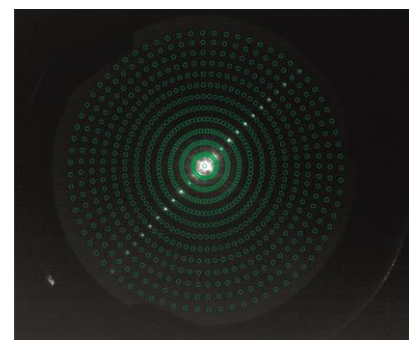


Рисунок 11 – Калибровочная сетка угловых координат, отмеченная на поверхности ОРЭ

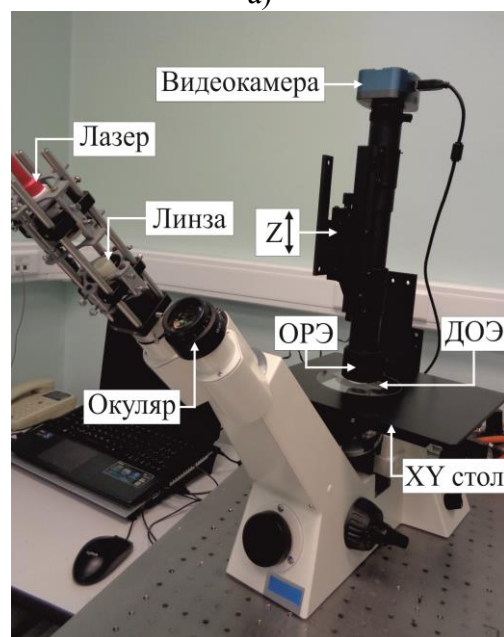
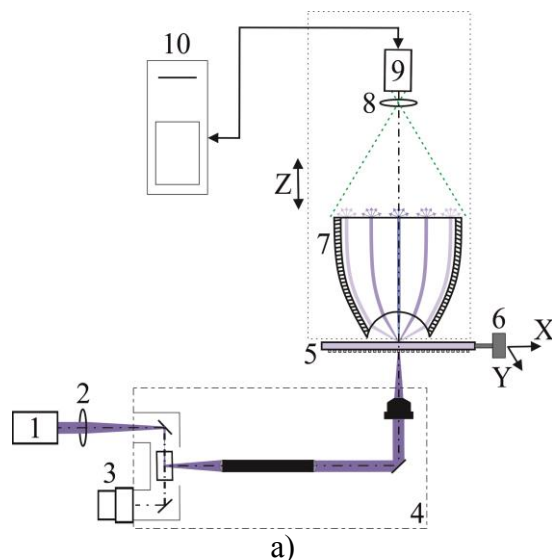
Проведённое исследование показало, что использование оптоволоконного рассеивающего экрана позволяет производить регистрацию дифракционной картины в широком телесном угле дифракции с помощью всего одной видеокамеры, установленной вдоль оси симметрии экрана. Даже при использовании ОРЭ, изготовленного на базе оптоволоконной шайбы, несмотря на дисторсионные искажения, возникающие при переносе изображения с первого торца экрана на второй, погрешность определения периода и угловой ориентации решётки при анализе пространственного распределения ДП, отклонившихся на больший угол дифракции, уменьшается.

По результатам проведённого исследования на базе оптического микроскопа был создан дифрактометрический стенд (рисунок 12), который позволяет объединить визуальный контроль элементов в отражённом свете и

дифрактометрический контроль на длине волны пробного пучка 405 нм в прошедшем свете, для элементов с диапазоном изменения периодов 0.45–1 мкм. Данное устройство предназначено для определения скважности тестовых металл/оксидных решёток, формируемых методом прямой безрезистной лазерной записи на тонких плёнках металла при различных параметрах мощности и скорости сканирования пучка. Целью анализа тестовых структур является определение оптимальных параметров записи итогового элемента. Исследуемые решётки характеризуются малым размером (несколько десятков микрон), а их период не превышает 1 мкм.

Для оценки ширины линий металл/оксидных решёток по данным измеренной дифракционной эффективности (ДЭ) необходимо иметь возможность осуществлять расчёт их оптических характеристик в рамках строгой электромагнитной теории. Для этого с помощью пакета прикладных программ MATLAB [2] был разработан специальный программный код, в котором для расчёта дифракционной эффективности используются функции инструментария GD-Calc (Grating Diffraction Calculator) [3]. На основе данного программного кода был разработан алгоритм оценки скважности металл/оксидных решёток по анализу измеренной дифракционной эффективности. Для его реализации измерение ДЭ осуществляется для двух направлений поляризации (TE и TM) в прошедшем и отражённом от исследуемых структур свете при нормальном падении пробного пучка.

В таблице 1 представлены результаты оценки ширины оксидных дорожек по анализу измеренной дифракционной эффективности для тестовых решёток, сформированных в плёнке титана толщиной 70 нм при различных параметрах мощности (P) и скорости сканирования лазерного записывающего пучка (V). Полученные результаты сравнивались с данными, измеренными по анализу микроизображений исследуемых решёток. Было получено хорошее согласие результатов. Максимальное расхождение составило ~ 50 нм, что соответствует 5% от величины периода измеряемых решёток. Это свидетельствует о том, что предложенный метод может применяться для оценки ширины линий тестовых металл/оксидных решёток с целью подбора оптимальных параметров записи по анализу ДЭ измеренной в прошедшем и отражённом свете.



а) – упрощённая схема: 1 – источник излучения; 2 – фокусирующая линза; 3 – окуляр; 4 – оптический канал микроскопа; 5 – исследуемый ДОЭ; 6 – ХУ-координатный столик; 7 – оптоволоконный рассеивающий экран; 8 – объектив; 9 – видеокамера; 10 – компьютер;
б) – внешний вид

Рисунок 12 – Дифрактометрический стенд на базе оптического микроскопа «Axiovert 40 MAT»

Таблица 1. Измерение ширины оксидных дорожек тестовых металл/оксидных решёток

Параметры записи решётки	P, мВт	17.8	16.9	15.9
	V, мм/с	175.9	156.8	135.7
Ширина оксидных дорожек, измеренная по анализу микроизображений, нм		549	490	461
Ширина оксидных дорожек, измеренная по анализу ДЭ, нм		604.5±12.5	483.5±8.5	445±11

Вторая глава диссертации посвящена разработке методов поэтапного и финишного контроля при изготовлении рельефно-фазовых оптических элементов по анализу параметров встроенных тестовых структур.

В *разделе 2.1* приводятся результаты исследования дифрактометрического метода финишного контроля при изготовлении РОЭ, рассчитанных для работы в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолета на пропускание, расчётная глубина рельефа которых позволяет обеспечить разность фаз $\geq 2\pi$ на рабочей длине волны в прошедшем свете. Предложенный метод основан на анализе дифракционной эффективности встроенных тестовых линейных решёток (ТЛР) с кусочно-непрерывным рельефом в отражённом свете. Глубина ТЛР равна максимальной глубине в рабочей области РОЭ. Так как РОЭ рассчитан для работы на пропускание в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолета, можно подобрать лазерный источник видимого диапазона, использование которого при нормальном падении пробного пучка на ТЛР позволит обеспечить такую разность фаз в отражённом свете, при которой ДЭ в рабочем порядке дифракции (m_p) решётки будет максимальной и в теории может достигать 100%. Длина волны λ_0 такого источника в видимом диапазоне спектра может быть определена как

$$\begin{cases} \lambda_0 = \frac{2 \cdot h_{\text{ТЛР}}}{m_p} \\ 380 \leq \lambda_0 \leq 780 \end{cases}, \quad (2)$$

где $h_{\text{ТЛР}}$ – глубина ТЛР, $m_p = 1, 2, 3 \dots$ – номер рабочего дифракционного порядка для ТЛР в отражённом свете при нормальном падении пробного пучка с длиной волны λ_0 . Отклонение параметров сформированного микрорельефа от расчётных значений приведёт к снижению ДЭ в рабочем порядке дифракции ТЛР. Таким образом, измерение и анализ ДЭ тестовой линейной решётки в отражённом свете позволяет оценить погрешность изготовления фазовой структуры РОЭ.

На сегодняшний день источники когерентного излучения могут иметь определённый стандартный набор длин волн. В связи с этим для осуществления контроля выбирается максимально приемлемый источник излучения, длина волны которого $\lambda_{\text{и}}$ приближена к значению λ_0 . Для компенсации несоответствия используемой длины волны расчётной при осуществлении контроля пробный пучок падает на структуру ТЛР под углом θ к нормали, который определяется как

$$\theta = \arccos\left(\frac{m_p \cdot \lambda_{\text{и}}}{2 \cdot h_{\text{ТЛР}}}\right). \quad (3)$$

В процессе измерения влияние деструктивной интерференции на измерение интенсивности нулевого порядка дифракции устраняется путем установки исследуемого элемента через слой иммерсионной жидкости на опорную подложку (обратная сторона которой выполнена в виде клина или имеет рассеивающее покрытие), которая выполнена из материала с таким же коэффициентом преломления, что и исследуемый РОЭ. Иммерсионная жидкость, коэффициент преломления которой $n_2 \approx n_1$ (где n_1 – коэффициент преломления материала

подложки исследуемого РОЭ), позволяет «убрать» воздушную границу и тем самым обеспечить беспрепятственное попадание прошедшего излучения на обратную сторону опорной подложки (ОП).

Для апробации предложенного метода было проведено исследование применения двух типов ОП: клиновой и плоской с обратной матовой поверхностью. Полученные результаты показали, что оба типа предложенных опорных подложек позволяют производить измерения ДЭ в отражённом свете от структур, выполненных в оптически прозрачном материале. При этом в измерительных схемах, в которых для регистрации ДЭ используются статично установленные фотоприёмники, наиболее эффективным является использование клиновой ОП, так как в этом случае полностью исключается попадание отражённого (или рассеянного) от обратной поверхности подложки излучения в измерительный канал. Однако, в случае измерения ДЭ в широком угловом диапазоне путём регистрации ДК с поверхности рассеивающих экранов методами, описанными в главе 1 данной диссертационной работы, наиболее эффективным является использование плоской ОП с обратной матовой поверхностью. Это позволяет исключить регистрацию ложной дифракционной картины, отражённой от обратной стороны клиновой ОП.

Предложенный метод измерения ДЭ тестовых линейных решёток с использованием клиновой ОП был реализован в автоматическом режиме на многоканальной измерительной системе (рисунок 13 и рисунок 14), предназначенной для контроля при изготовлении элементов дифракционной и конформальной оптики. Данная система объединяет в себе дифрактометрические и спектральные методы контроля различных параметров исследуемых элементов. В частности, на данном устройстве производится автоматическое измерение ДЭ ТЛР в отражённом свете (канал №1), измерение функции пропускания растрового фотошаблона в области тестовой синусоидальной решётки (канал №2 – более подробно об этом написано в разделе 2.2 диссертационной работы). Канал №3 предназначен для осуществления спектральных измерений в отражённом или прошедшем излучении.

РОЭ, для которых разрабатывался данный метод контроля, изготавливаются методом проекционной фотолитографии с растриваемым фотошаблоном на кварцевой подложке диаметром 100 мм. В процессе изготовления на одной

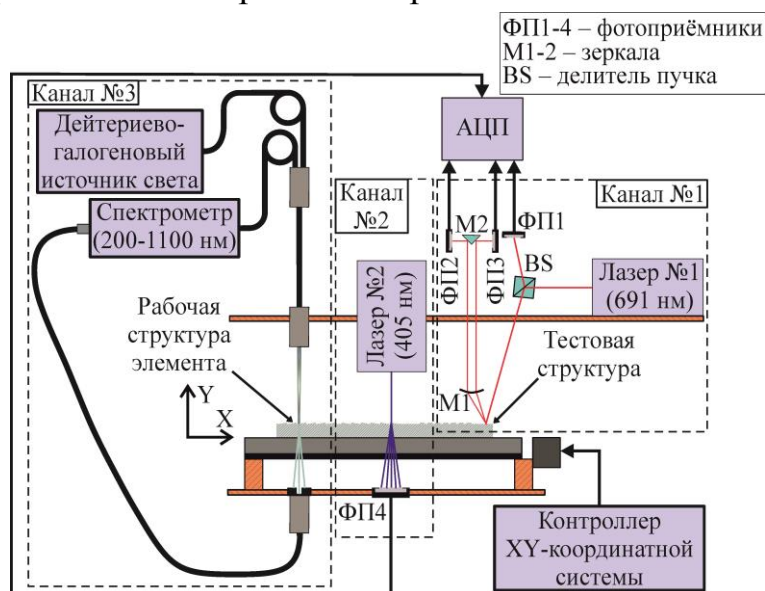


Рисунок 13 – Упрощённая схема многоканальной измерительной системы

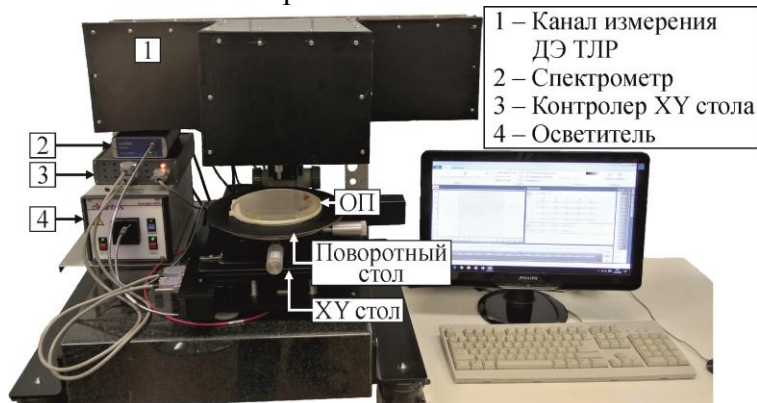


Рисунок 14 – Внешний вид многоканальной измерительной системы

подложке формируется по 20 РОЭ. Каждый элемент, помимо рабочей структуры, включает в себя по две ТЛР с периодом 100 мкм. Расчётная глубина рельефа РОЭ, как и глубина ТЛР $h_{\text{ТЛР}}$, составляет 344 нм. Минимально допустимое значение ДЭ первого порядка дифракции ТЛР при контроле данных элементов составляет 90%, что соответствует отклонению глубины структуры от рассчитанных параметров ~ 35 нм. Предложенный метод по анализу ДЭ ТЛР позволяет достаточно быстро (в течение одного часа с учётом юстировки системы перед началом измерения) производить контроль подложек, включающих в себя группу РОЭ. Его применение позволило значительно повысить скорость оценки погрешности изготовления этих элементов по сравнению с методом анализа параметров микрорельефа ТЛР по профилограммам, полученным на оптическом профилометре.

В *разделе 2.2* приводятся результаты исследования разработанного метода для осуществления поэтапного контроля РОЭ, изготавливаемых с применением технологии растровой полутонной фотолитографии. Метод основан на формировании и анализе встроенных тестовых структур с синусоидальной формой профиля.

Каждый из этапов растровой полутонной технологии является критическим, то есть ошибки, возникшие на одном из них, не могут быть исправлены в дальнейшем. Контроль на всех технологических этапах было предложено осуществлять путём анализа параметров тестовых структур, которые формируются вокруг изготавливаемого элемента. Исследование показало, что использование для этих целей тестовых линейных решёток не позволяет получать полные характеристические кривые. Это связано с тем, что профиль ТЛР, сформированной в плёнке фоторезиста, имеет широкий обратный скат. Значительная доля зависимости глубины от дозы экспозиции (до 15% от периода ТЛР), попавшая на обратный скат, не может быть определена по полученной профилограмме тестовой структуры. В случае, когда обратный скат треугольного рельефа близок к вертикальному, стилусные и оптические профилометры не передают корректно профиль на резких скачках исследуемого микрорельефа. Это также вносит погрешность в результаты, полученные с помощью профилометрического анализа параметров ТЛР. Для решения этой проблемы было предложено использовать тестовую синусоидальную решётку (ТСР). Синусоидальные решетки не имеют фазовых скачков и, следовательно, гораздо менее искажаются в процессе изготовления и измерения. Форма такой решётки во всех областях сформированного профиля сопоставима с функцией теоретического синуса и не имеет искажения вблизи областей экстремумов рельефа, свойственных решеткам с кусочно-непрерывным профилем. Помимо этого, благодаря тому, что функция пропускания растрового фотошаблона в области, предназначенной для формирования ТСР, меняется плавно, сканирование этой области пробным лазерным пучком и измерение интенсивности прошедшего излучения (рисунок 15) позволяет получить полную характеристическую кривую функции пропускания изготовленного фотошаблона и восстановить функцию скважности записанных растровых ячеек. Сравнение полученных результатов с расчётными значениями позволяет осуществлять контроль качества изготовленного фотошаблона. Контроль функции пропускания ячеек растрового фотошаблона был также реализован в автоматическом режиме на созданной в рамках данной работы многоканальной измерительной системе (рисунок 13 – канал №2).

После формирования микрорельефа в слое фоторезиста измерение параметров ТСР позволяет подбирать оптимальные параметры экспонирования, а также оценить отклонения формы измеренного профиля от расчётных параметров. Так как форма рельефа напрямую зависит от заполнения растровых ячеек фотошаблона (функции скважности), полученные данные отклонения формы профиля ТСР могут быть использованы для записи скорректированного фотошаблона, который позволит достичь требуемой формы изготавливаемого микрорельефа. На рисунке 16 показан процесс коррекции функции скважности для записи скорректированного растрового фотошаблона по результатам сравнения формы тестовой синусоидальной решётки, сформированной в плёнке фоторезиста и теоретической синусоидальной функции. Использование скорректированного фотошаблона позволило уменьшить максимальное отклонение формы тестовой синусоидальной решетки до значений 0.9 – 2.6% при различных параметрах экспонирования фоторезиста. В то время как до коррекции оно составляло 6.9 – 8.5% для тех же параметров экспонирования.

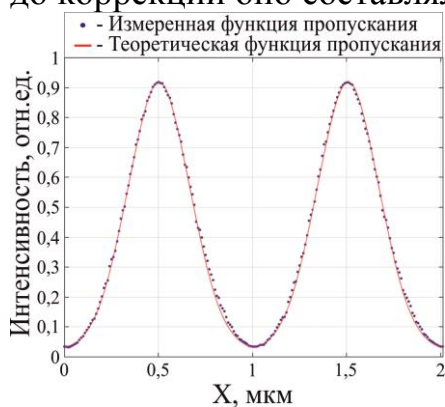


Рисунок 15 – Контроль растрового фотошаблона по анализу прошедшей интенсивности в области ТСР

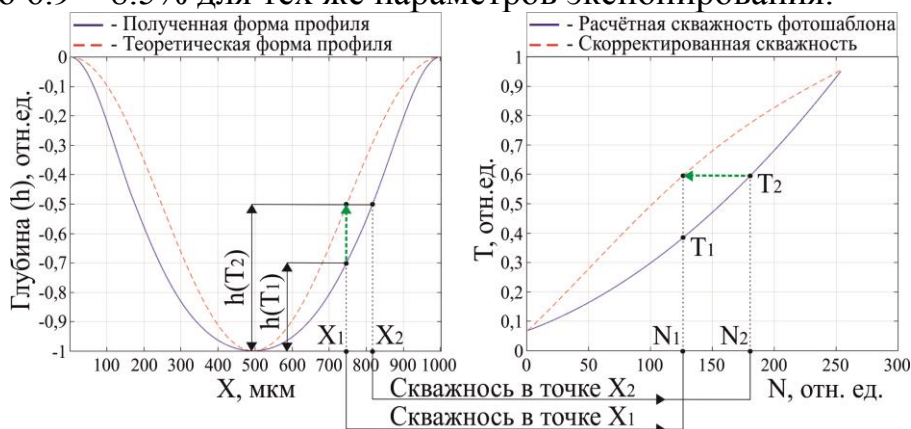


Рисунок 16 – Коррекция функции скважности полутонного растрового фотошаблона по данным контроля формы профиля тестовой синусоидальной решётки, сформированной в плёнке фоторезиста

Результаты проведённого исследования показали, что использование тестовых синусоидальных решёток для осуществления поэтапного контроля позволяет получать полные характеристические кривые на ключевых этапах растровой полутонной технологии и, тем самым, минимизировать ошибки, возникающие в процессе изготовления РОЭ.

Третья глава диссертации посвящена разработке метода количественной оценки характеристик лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) по анализу их микроизображений для определения относительной площади дефектов исследуемой структуры, прямолинейности и параллельности дорожек, формирующих ее, а также производительности записи, как функции технологических параметров.

В *разделе 2.1* приводится описание разработанного метода количественной оценки характеристик ЛИППС по анализу их микроизображений. Предложенный алгоритм основан на методе оценки упорядоченности исследуемой структуры по определению величины параметра DLOA (dispersion in the LIPSS orientation angle) – параметра количественной оценки дисперсии угловой ориентации ЛИППС [4]. DLOA определяется путём анализа исследуемого микроизображения в программе ImageJ [5] с помощью плагина OrientationJ [6]. Данное программное обеспечение на основе анализа градиентного структурного тензора позволяет определить локальную угловую ориентацию для каждого пикселя микроизображения. Построив

график углового распределения (УР) пикселей, параметр DLOA определяется как полуширина на полувысоте полученного графика (величина $\delta\theta$ на рисунке 17).

DLOA является параметром количественной оценки прямолинейности и лишь частично характеризует параллельность дорожек, формирующих ЛИППС. Это связано с тем, что полуширина на полувысоте не включает в себя информацию об основании полученного графика УР. В связи с этим, для количественной оценки параллельности дорожек, формирующих ЛИППС, по отношению к основной ориентации исследуемой структуры, в рамках проведённого исследования было предложено определять нормированную площадь под кривой графика УР (НПУР), которая в общем виде находится как

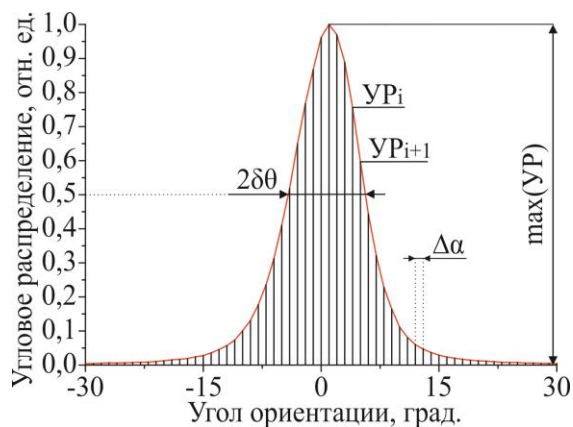


Рисунок 17 – Определение параметров DLOA и НПУР по графику УР (приведён фрагмент графика)

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\alpha \cdot \sum_{i=1}^{180/\Delta\alpha} (YR)_i}{\max(YR)}, \quad (4)$$

где $\Delta\alpha$ – шаг дискретизации по углу ориентации используемый при построении графика УР, $\max(YR)$ – высота графика углового распределения пикселей (рисунок 17).

Так как при обработке микроизображения в программе ImageJ угловая ориентация определяется для каждого пикселя отдельно, было предложено для построения графика УР использовать только те пиксели, которые характеризуют эффективно записанную область исследуемой ЛИППС. Это позволяет минимизировать влияние дефектных областей структуры на определение прямолинейности и параллельности дорожек, формирующих эффективно записанную область решётки. Кроме того, это даёт возможность обрабатывать структуры со сложной формой границы, исключив из анализа пиксели, которые относятся на микроизображении к области, не модифицированной лазерным излучением.

Для этого был разработан алгоритм, который по полученным в программе ImageJ картам локальной угловой ориентации определяет для каждого пикселя, какую область на микроизображении он характеризует. На рисунке 18 показан пример обработки микроизображения термохимической ЛИППС (ТЛИППС), сформированной на плёнке хрома толщиной 30 нм, при однопроходном сканировании образца в процессе записи решётки. На рисунке 18б белые пиксели характеризуют области, не модифицированные лазерным излучением,

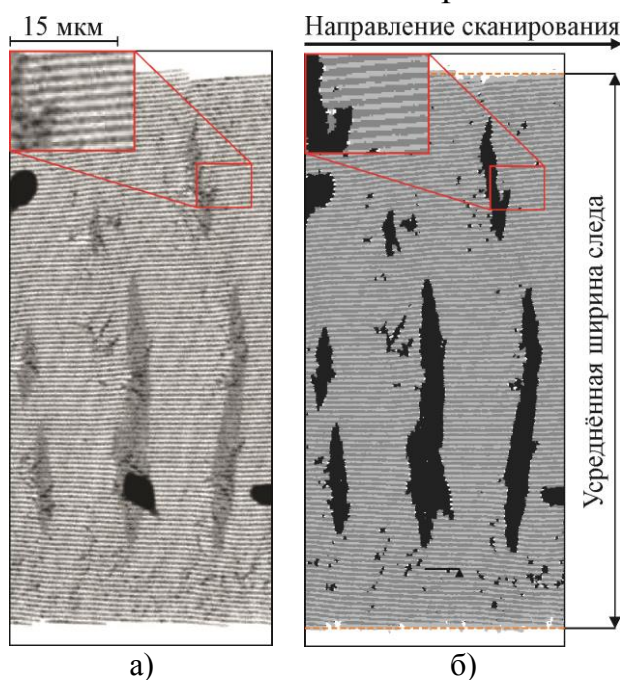


Рисунок 18 – Результат обработки микроизображения ТЛИППС: фрагмент изображения до обработки разработанным алгоритмом (а) и после (б)

чёрные пиксели – области дефектов исследуемой структуры, а ТЛИППС в эффективно записанной области представлена оттенками серого.

Определив на микроизображении области, не модифицированные лазерным излучением и пиксели, характеризующие области дефектов структуры, можно рассчитать относительную площадь дефектов (ОПД):

$$D = \frac{Pix_D}{Pix_\Sigma} * 100 \% , \quad (5)$$

где Pix_D – общее количество пикселей, которые характеризуют дефектные области ТЛИППС, Pix_Σ – общее количество пикселей, характеризующих исследуемую ТЛИППС на обрабатываемом микроизображении.

Количественную оценку производительности сканирующей записи (ПСЗ) ТЛИППС было предложено определять как произведение усреднённой ширины следа, сформированного при однопроводном сканировании образца (рисунок 18б), на скорость сканирования V :

$$S_{сз} = \frac{Pix_\Sigma * Pix_{SY}}{X_{scan}} * V , \quad (6)$$

где Pix_{SY} – физическая ширина пикселя на микроизображении в направлении перпендикулярном направлению сканирования, X_{scan} – длина зарегистрированного следа ТЛИППС (в пикселях) на обрабатываемом микроизображении.

В разделе 3.2 приведены результаты применения разработанного метода для количественной оценки характеристик ТЛИППС, записанных на тонких плёнках хрома (толщина 30 нм) и гафния (толщина 15 нм) астигматически сфокусированным гауссовым пучком (параметры излучения: длина волны 1026 нм; частота повторения импульсов в экспериментах составляла 200 кГц; длительность импульса на полувысоте 232 фс), по анализу микроизображений, полученных на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM3000. Для ТЛИППС, сформированных на плёнках хрома, полученные результаты показывают, что высокоупорядоченные и практически бездефектные структуры в диапазоне мощностей записывающего пучка 250–340 мВт формируются при скоростях сканирования, не превышающих ~ 100 мкм/с. При данной скорости записи ОПД на сформированной структуре практически не зависит от мощности записывающего пучка и составляет 2–3% (рисунок 19а). Однако при дальнейшем увеличении скорости ОПД существенно возрастает, а также ухудшается и упорядоченность сформированной структуры (рисунок 19б и рисунок 19в).

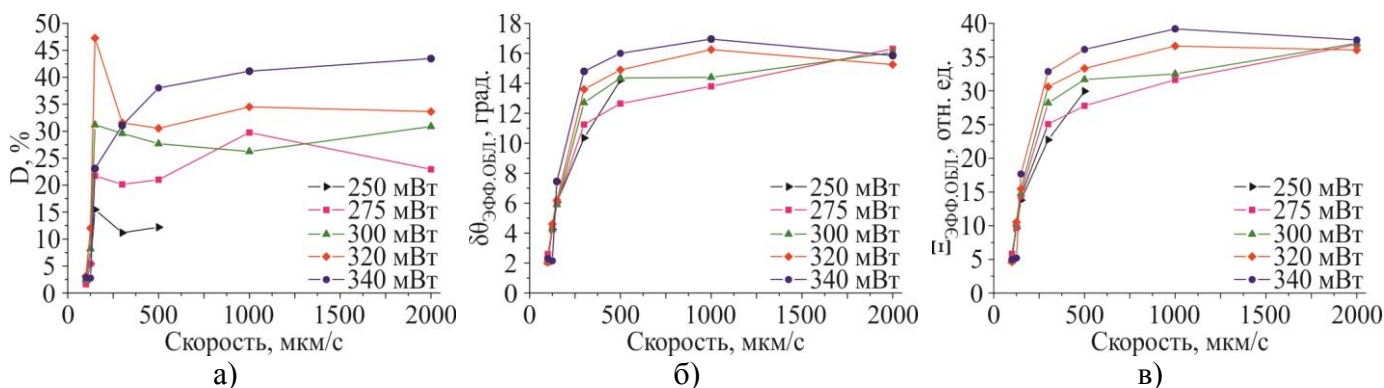


Рисунок 19 – Результат анализа характеристик ТЛИППС, сформированных на плёнке хрома: ОПД (а), а также параметры DLOA (б) и НПУР (в) в эффективно записанной области структуры

Для ТЛИППС, сформированных на плёнках гафния, высокоупорядоченные и практически бездефектные структуры были получены при мощности записывающего пучка 250 мВт и скорости сканирования 2000 мкм/с

(рисунок 20а-в). Величина ОПД структуры при данных параметрах записи составила ~ 2%. При уменьшении скорости сканирования наблюдается постепенное переэкспонирование в центральной области сформированной ТЛИППС. Из-за чего при скорости сканирования 100 мкм/с величина ОПД увеличивается до 46%.

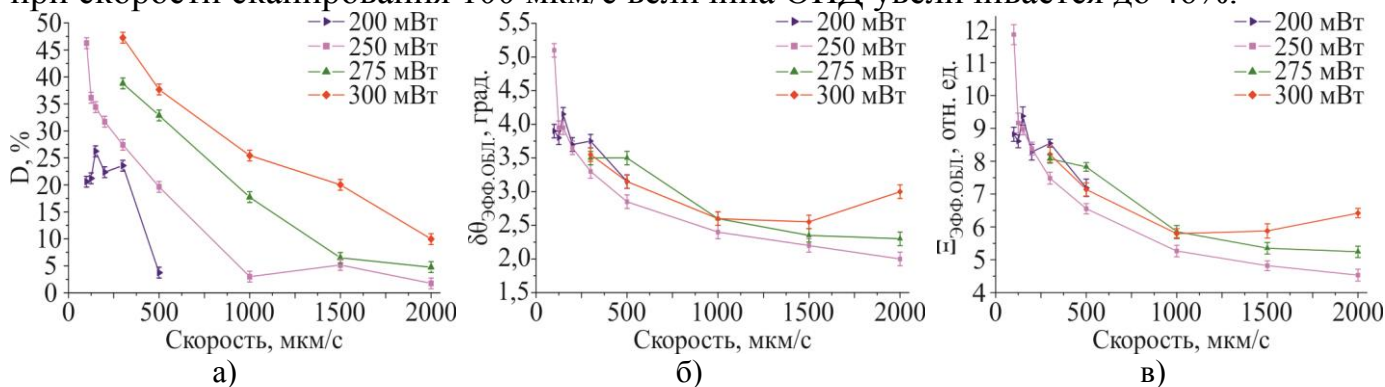


Рисунок 20 – Результат анализа характеристик ТЛИППС, сформированных на плёнке гафния: ОПД (а), а также параметры DLOA (б) и НПУР (в) в эффективно записанной области структуры

Интересно отметить, что в исследуемых диапазонах мощности и скорости сканирования записывающего пучка данные структуры имеют высокую степень упорядоченности. При этом дефектность, прямолинейность и параллельность дорожек структуры улучшаются с увеличением скорости сканирования, а производительность записи неуклонно возрастает (рисунок 21). Таким образом, полученные результаты показывают, что гафний является перспективным материалом для высокопроизводительного формирования ТЛИППС с высокой степенью упорядоченности структур.

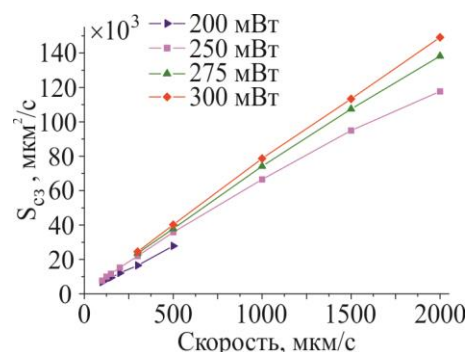


Рисунок 21 – Производительность сканирующей записи ТЛИППС на плёнке гафния

В **Заключении** сформулированы следующие основные результаты работы:

1. Предложены и экспериментально исследованы схемы видеорегистрации дифракционной картины в прошедшем или отражённом от исследуемого ДООЭ свете в диапазонах угла дифракции не менее чем $\pm 80^\circ$ и азимутального угла $0^\circ - 360^\circ$ с использованием объёмного рассеивающего экрана, установленного между исследуемым элементом и системой видеорегистрации. Показано, что при использовании полусферического рассеивающего экрана для регистрации дифракционной картины в заявленном угловом диапазоне достаточным является использование четырёх видеокамер, расположенных вокруг экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси его симметрии. В свою очередь, использование рассеивающего экрана, имеющего форму сегмента параболоида вращения, поверхность которого в угловом диапазоне $\pm 45^\circ$ от оси его симметрии приближена к форме полусферы, или оптоволоконного рассеивающего экрана с регулярным расположением волокон, торцы которых образуют входную сферически вогнутую и выходную плоскую поверхности экрана, позволяет регистрировать дифракционную картину в заявленном угловом диапазоне с помощью всего одной видеокамеры с проекционным объективом, расположенной вдоль оси симметрии рассеивающего экрана.

По результатам проведённого исследования созданы два оптико-электронных устройства дифрактометрического контроля параметров ДООЭ. В первом при регистрации дифракционной картины в отражённом свете используется

полусферический рассеивающий экран, установленный между исследуемым элементом, и четырьмя видеокамерами, расположенными вокруг экрана с шагом по азимутальному углу 90° и под углом 45° к оси его симметрии. Диапазон периодов элементов, контролируемых на созданном устройстве, составляет 0.45–6.47 мкм. Второе устройство на базе инвертированного оптического микроскопа реализует одновременный визуальный контроль элементов в отражённом свете и дифрактометрический контроль на длине волны пробного пучка 405 нм в прошедшем свете. В данном устройстве при регистрации дифракционной картины используется оптоволоконный рассеивающий экран с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским.

2. Предложен и экспериментально апробирован метод дифрактометрического контроля в отражённом свете при изготовлении РОЭ, предназначенных для работы в дальнем ультрафиолете на пропускание. Он основан на анализе дифракционной эффективности тестовых линейных решёток с кусочно-непрерывным рельефом, сформированных вблизи рабочей области РОЭ. Предложенный метод позволяет осуществлять контроль не на расчётной длине волны, а с использованием лазерного источника видимого диапазона, длина волны которого и угол падения пучка на тестовые решетки выбираются из условия получения максимальной дифракционной эффективности в рабочем порядке дифракции на отражение для расчётных параметров их микрорельефа. Влияние деструктивной интерференции на измерение нулевого порядка дифракции устраняется путем установки РОЭ через слой иммерсионной жидкости на опорную пластину (обратная сторона которой выполнена в виде клина или имеет рассеивающее покрытие) из материала с таким же коэффициентом преломления, что и исследуемый элемент. Применение данного метода для контроля подложек, включающих в себя группу РОЭ (с двумя тестовыми решётками для каждого элемента), позволило значительно повысить скорость оценки погрешности их изготовления.

3. Разработан и экспериментально исследован метод поэтапного контроля РОЭ, изготавливаемых с использованием растровой полутонковой фотолитографии. Он основан на анализе параметров тестовых синусоидальных решеток. Их использование позволяет получать полные характеристические кривые на каждом технологическом этапе изготовления элемента без искажения результатов измерения вблизи резких перепадов рельефа, свойственных решеткам с кусочно-непрерывным профилем. Это даёт возможность подбирать параметры экспонирования фоторезиста, измерять отклонение полученной формы профиля и определять необходимую функцию пропускания растрового фотошаблона, дающую минимальные погрешности формируемого микрорельефа.

4. Разработан метод количественной оценки лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, который основан на анализе карт угловой ориентации пикселей на их микроизображениях и позволяет определять такие характеристики, как относительная площадь дефектов исследуемых структур, прямолинейность и параллельность дорожек в них, а также производительность записи, как функцию технологических параметров. Преимуществом метода является попиксельная обработка микроизображений, позволяющая исследовать структуры сложной формы и исключать дефекты при анализе упорядоченности. Последнее минимизирует влияние дефектных областей на определение прямолинейности и параллельности записанных дорожек ЛИППС.

5. Для термохимических ЛИППС, сформированных на тонких плёнках хрома (толщина 30 нм) и гафния (толщина 15 нм), были впервые получены новые количественные характеристики таких параметров, как относительная площадь дефектов, прямолинейность и параллельность дорожек структуры, а также производительность записи в зависимости от мощности и скорости сканирования записывающего астигматически сфокусированного фемтосекундного гауссова пучка. Полученные результаты показали, что на плёнках хрома высокоупорядоченные и практически бездефектные структуры формируются при скоростях сканирования, не превышающих ~ 100 мкм/с (в диапазоне мощностей записывающего пучка 250–340 мВт). В то время как для термохимических ЛИППС на плёнках гафния было получено, что дефектность и упорядоченность улучшаются с увеличением скорости сканирования как минимум до 2000 мкм/с, а производительность записи при этом монотонно возрастает (в диапазоне мощностей записывающего пучка 250–300 мВт). Полученные результаты показывают, что гафний является перспективным материалом для высокопроизводительной записи термохимических ЛИППС с высокой степенью упорядоченности структур.

В **Приложениях 1, 2 и 3** представлены копии полученных при выполнении работы патента на изобретение, акта о внедрении результатов научных исследований, а также выписки из протокола заседания бюро Объединенного ученого Совета по физическим наукам СО РАН о рекомендации включения результатов исследования по теме «Высокопроизводительная запись термохимических лазерно-индуцированных периодических структур на пленках металлов» в доклад Президенту РФ и Правительству РФ о состоянии фундаментальных наук в Российской Федерации и за рубежом и важнейших научных достижениях, полученных российскими учеными в 2019 году.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Белоусов, Д. А.** Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой / Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39. – №. 5. – С. 678–686.
2. **Белоусов, Д. А.** Устройство для регистрации дифракционной картины синтезированных голограмм в широком угловом диапазоне / Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов // Автометрия. – 2018. – Т. 54. – № 2. – С. 35–42.
3. **Belousov, D. A.** Optimization of test gratings and their measurement at manufacturing of diffractive optics and conformal correctors / D. A. Belousov, V. P. Korolkov, R. K. Nasyrov // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2018. – Vol. 10818. – Article number 1081814. – Pp. 1–9.
4. **Belousov, D. A.** Laser beam diffraction inspection of periodic metal/oxide structures with submicron period / D. A. Belousov, V. P. Korolkov, V. N. Khomutov, R. K. Nasyrov // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2019. – Vol. 11030. – Article number 110301C. – Pp. 1–9.
5. **Belousov, D. A.** Multi-channel scanning measuring system for testing of diffractive structures and thin transparent films / V. P. Korolkov, V. V. Cherkashin, V. N. Khomutov, D. A. Belousov // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2019. – Vol. 11030. – Article number 110301E. – Pp. 1–12.
6. **Belousov, D. A.** Increasing the spatial resolution of direct laser writing of diffractive structures on thin films of titanium group metals / V. P. Korolkov., A. G. Sedukhin,

- D. A. Belousov, R. V. Shimansky, V. N. Khomutov, S. L. Mikerin, E. V. Spesivtsev, R. I. Kutz // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2019. – Vol. 11030. – Article number 110300A. – Pp. 1–12.
7. **Belousov, D. A.** Fast formation of hybrid periodic surface structures on Hf thin-film by focused femtosecond laser beam / A. V. Dostovalov, K. A. Bronnikov, D. A. Belousov, V. P. Korolkov, S. A. Babin // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2019. – Vol. 11183. – Article number 111830U. – Pp. 1–6.
 8. **Belousov, D. A.** Spectral data of refractive index and extinction coefficient for thin films of titanium group metals used for fabrication of optical microstructures / D. A. Belousov, V. S. Terent'ev, E. V. Spesivtsev, V. P. Korolkov // Data in Brief. – 2020. – Vol. 28. – Article number 104903. – Pp. 1–5.
 9. **Белоусов, Д. А.** Метод обработки микроизображений для анализа структур ТЛИППС / Д. А. Белоусов, А. В. Достовалов, В. П. Корольков, С. Л. Микерин // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43. – №. 6. – С. 936-945.
 10. **Belousov, D. A.** Determination of linewidth for metal/oxide gratings by measured diffraction efficiency in several orders / D. A. Belousov, V. P. Korolkov, R. V. Shimansky, V. N. Khomutov, R. I. Kuts // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2020. – Vol. 11551. – Article number 115511N. – Pp. 1–7.
 11. **Белоусов, Д. А.** Влияние скорости сканирования на формирование ТЛИППС радиально-симметричным и эллиптическим гауссовым фемтосекундным лазерным пучком / А. В. Достовалов, В. С. Тереньтьев, К. А. Бронников, Д. А. Белоусов, В. П. Корольков // Прикладная фотоника. – 2018. – Т. 5. – № 3. – С. 157-172.
 12. Пат. 2634372 Рос. Федерация. Устройство для контроля углового положения дифракционных порядков дифракционных элементов (варианты) [Текст] / А. Г. Полещук, Д. А. Белоусов // № 2016121799; Заявл. 01.06.2016; Оpubл. 26.10.2017, Бюл. № 30.

Цитированная литература

1. Корольков В. П. Конформальные оптические элементы для коррекции искажений волнового фронта в активных элементах YAG:Nd³⁺ / В. П. Корольков, Р. К. Насыров, А. Г. Полещук, Ю. Д. Арапов, А. Ф. Иванов // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43. – №. 2. – С. 117-121.
2. MATLAB. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
3. Johnson, K. Grating Diffraction Calculator (GD-Calc). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kjinnovation.com/>
4. Gnilitzkyi, I. High-speed manufacturing of highly regular femtosecond laser-induced periodic surface structures: Physical origin of regularity / I. Gnilitzkyi, T. J. Y. Derrien, Y. Levy, N. M. Bulgakova, T. Mocek, L. Orazi // Scientific reports. – 2017. – Vol. 7. – №. 1. – Article number 8485. – Pp. 1–11.
5. ImageJ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://imagej.net/ImageJ>
6. OrientationJ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bigwww.epfl.ch/demo/orientation/>