



**САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086  
Тел.: +7 (846) 335-18-26 , факс: +7 (846) 335-18-36  
Сайт: [www.ssau.ru](http://www.ssau.ru), e-mail: [ssau@ssau.ru](mailto:ssau@ssau.ru)  
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,  
ИНН 6316000632, КПП 631601001

16 АПР 2021 № 104-1817

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

Первый проректор – проректор  
по научно-исследовательской работе,

Д.Т.Н., доцент

А.Б. Прокофьев

2021 г.



### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Белоусова Дмитрия Александровича  
«Разработка и исследование методов и устройств локального контроля рельефно-  
фазовых оптических элементов и амплитудных решёток»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 01.04.05 – Оптика

#### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время во многих высокотехнологичных отраслях промышленности и приборостроении находят широкое применение оптические элементы, имеющие бинарный, многоуровневый или кусочно-непрерывный микрорельеф с глубиной до нескольких микрометров. Данные элементы используются в оптических схемах для осуществления фокусирующих, корректирующих, поляризационных, светоделительных и других преобразований световых пучков. Соответствие осуществляемого преобразования расчётным параметрам и его энергетическая эффективность напрямую зависят от погрешностей изготовления поверхностной структуры. Многообразие возможных вариантов формы микрорельефа, а также технологических методов, используемых для его изготовления, затрудняет использование универсальных подходов, пригодных для контроля всех типов оптических элементов с поверхностной структурой.

Поэтому актуальность диссертационной работы Белоусова Д.А., которая посвящена разработке методов и устройств, создаваемых для контроля конкретных типов

микрорельефа оптических элементов с поверхностной структурой в рамках выбранного технологического процесса их изготовления, сомнений не вызывает.

## **Цель диссертационной 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.

## **Структура, содержание и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа содержит 178 страниц и состоит из введения, 3 глав, заключения, списка сокращений, списка условных обозначений, 3 приложений и списка цитируемой литературы. Содержание и структура диссертации выстроены логично, соответствуют поставленной цели и задачам исследования, сопровождаются достаточным количеством иллюстраций (79) и таблиц (7).

Во введении содержится обоснование актуальности темы исследования, представлен краткий обзор литературы по проблеме, сформулированы цель диссертационной работы, задачи, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а также приведён список публикаций автора по теме работы.

В первой главе представлены результаты исследования предложенных схем видеорегистрации дифракционной картины, формирующейся на поверхности объёмных рассеивающих экранов в диапазонах угла дифракции не менее чем  $\pm 80^\circ$  и азимутального угла  $0^\circ$ - $360^\circ$ , с целью создания оптико-электронных устройств дифрактометрического контроля параметров дифракционных оптических элементов (ДОЭ), работающих в прошедшем или отражённом свете. В работе исследованы схемы видеорегистрации 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. Приводится описание двух устройств дифрактометрического контроля, созданных по результатам проведённого исследования. Одно из них предназначено для регистрации дифракционной картины в отражённом от элемента свете. В данном устройстве при регистрации дифракционной картины используется рассеивающий экран имеющий

форму полусферы, установленный между исследуемым элементом и четырьмя видеокамерами. Во втором, дифракционная картина в прошедшем свете, формируется на поверхности оптоволоконного рассеивающего экрана с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским. Данное устройство реализовано на базе оптического микроскопа, что позволяет также осуществлять визуальный контроль исследуемых элементов в отражённом свете.

Во второй главе приведены результаты исследований двух предложенных методов, основанных на анализе параметров тестовых структур и предназначенных для контроля при изготовлении рельефно-фазовых оптических элементов. Первый метод основан на анализе дифракционной эффективности тестовых линейных решёток с кусочно-непрерывным рельефом в отражённом свете и предназначен для осуществления финишного контроля при изготовлении элементов, рассчитанных для работы в дальнем ультрафиолетовом диапазоне длин волн на пропускание. Предложенный метод позволяет выполнять контроль таких элементов с использованием лазерного источника, длина волны которого лежит в видимом диапазоне спектра. Второй метод основан на анализе параметров тестовых синусоидальных решёток и позволяет осуществлять контроль на всех ключевых этапах растровой полутоновой технологии при изготовлении рельефно-фазовых оптических элементов.

Третья глава посвящена разработке метода количественной оценки лазерно-индуктированных периодических поверхностных структур (ЛИПС), 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. Представлены экспериментальные результаты применения разработанного метода для количественной оценки вышеописанных характеристик термохимических ЛИПС сформированных на тонких плёнках хрома и гафния, при их записи астигматически сфокусированным гауссовым пучком фемтосекундного лазерного источника в диапазоне скоростей сканирования образца 100–2000 мкм/с.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

**Научная новизна результатов диссертационной работы** заключается в

- предложенных и исследованных автором оптических схемах устройств дифрактометрического контроля, в которых при регистрации дифракционной

картины от локальной области исследуемого элемента, освещённой пробным лазерным пучком, используется объёмный рассеивающий экран, установленный между исследуемым дифракционным оптическим элементом и системой видеорегистрации;

- разработке и создании автоматической оптико-электронной системы дифрактометрического контроля параметров дифракционных оптических элементов, в которой 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  $90^\circ$  и под углом  $45^\circ$  к оси его симметрии;

- разработке и создании дифрактометрического стенда на базе инвертированного оптического микроскопа, 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;

- впервые полученных для термохимических лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, сформированных на плёнках хрома и гафния, зависимых количественных характеристиках таких параметров как относительная площадь дефектов 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 диссертационной работы заключается в**

- результатах исследований предложенных схем видеорегистрации дифракционной картины в широком угловом диапазоне, на основе которых имеется возможность создавать автоматические системы дифрактометрического контроля дифракционных оптических элементов с высокой скоростью измерения параметров в локально контролируемой области элемента и при этом с широким диапазоном изменения периодов исследуемых структур: от сотен нанометров до нескольких десятков микрометров;

- разработке метода финишного контроля рельефно-фазовых оптических элементов, рассчитанных для работы в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолета на пропускание, с использованием общедоступных лазерных источников видимого диапазона;

- разработке метода контроля при изготовлении рельефно-фазовых оптических элементов на всех технологических этапах растровой полутоновой фотолитографии;
- разработке метода количественной оценки характеристик лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур по анализу их микроизображений.

### **Соответствие содержания диссертации заявленной научной специальности**

Диссертация полностью соответствует паспорту научной специальности 01.04.05 – Оптика (технические науки)

в части формулы специальности:

«Оптика – область фундаментальной науки и техники, предметом которой является исследование ... света и явлений при его распространении и взаимодействии с веществом. Свет, как электромагнитные волны, рассматривается в области спектра от мягкой рентгеновской до субмиллиметровой. Оптика создает основы новых технологий регистрации и обработки изображений, передачи ... энергии, диагностики ... техногенных объектов и процессов...»;

в части области исследования:

««1. Волновая (физическая) оптика ... дифракция, поляризация, когерентность света. Формирование световых пучков. ... Формирование и обработка оптических изображений, топография...»;

«2. Геометрическая (лучевая) оптика. Распространение и преобразование световых пучков. Новые принципы построения оптических систем и инструментов. ... Фотометрия.».

«б. ... Детектирование излучения...».

### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат полностью отражает содержание, научные положения, выводы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость диссертации, содержит информацию об основных полученных результатах и позволяет сделать заключение о научном уровне работы.

### **Апробация работы**

Основные результаты, полученные в рамках диссертационного исследования, опубликованы в 29 научных работах, в том числе в 11 статьях, 10 из которых опубликованы в изданиях, включенных в перечень ВАК и/или международные базы

цитирования Web of Science и Scopus. Автором получен 1 патент на изобретение и 1 акт о внедрении результатов диссертационного исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 14 международных и всероссийских конференциях.

### **Замечания по содержанию диссертации**

При общей высокой оценке диссертационной работы следует сделать несколько замечаний.

1. При описании схемы устройства дифрактометрического контроля с использованием оптоволоконного рассеивающего экрана (ОРЭ) на странице 54 автор пишет «...расстояние от контролируемого ДОЭ до ОРЭ  $\Delta_{oe}$  ...». Несмотря на то, что на рисунке 1.22 есть пояснение, что имеется ввиду под обозначением  $\Delta_{oe}$ , такое описание является некорректным. Так как используемый экран имеет в основании не плоскую, а выпуклую (относительно контролируемого элемента) форму поверхности, то  $\Delta_{oe}$  – это расстояние от ДОЭ до основания ОРЭ (или как указано в списке условных обозначений диссертационной работы « $\Delta_{oe}$  – расстояние от исследуемого элемента до нижней точки оптоволоконного рассеивающего экрана»).

2. В главе 2.1 описан метод финишного контроля элементов, рассчитанных для работы в дальнем ультрафиолетовом диапазоне длин волн на пропускание основанный на анализе дифракционной эффективности тестовых решёток с кусочно-непрерывным рельефом в отражённом свете. Формулы 2.1 и 2.2 показывают, как выбирается длина волны источника излучения видимого диапазона, и угол его падения на тестовую структуру для осуществления контроля. Однако в работе не уделяется внимание тому, с какой точностью необходимо выбирать данные параметры, и насколько критичным является стабильность длины волны используемого источника излучения.

3. Обзор в начале диссертации не вполне выполняет свою функцию формирования круга нерешенных проблем, на основе которого формулируется цель и задачи диссертации. И хотя автор в последующих главах это исправляет, все же появление цели и задач, выглядит непоследовательным.

4. В сформулированных автором результатах, нужно более четко подчеркивать новизну разработанных методов и их преимущество перед существующими.

Отмеченные недостатки не влияют на качество полученных результатов и не снижают научной и практической ценности диссертации.

## **Заключение по работе**

Диссертация «Разработка и исследование методов и устройств локального контроля рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток» Белоусова Д.А. является законченной и самостоятельной научно-исследовательской работой, выполненной автором на высоком научно-техническом уровне.

На основании вышеизложенного считаем, что диссертация Белоусова Д.А. «Разработка и исследование методов и устройств локального контроля рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток» по актуальности, степени научной новизны и практической значимости, объему выполненных исследований и их ценности соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Отзыв на диссертацию Белоусова Д.А. «Разработка и исследование методов и устройств локального контроля рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток» обсужден и утвержден на заседании НТС кафедры технической кибернетики 8 апреля 2021 года, протокол № 2.

Отзыв составлен профессором кафедры технической кибернетики, д.ф-м.н. Скидановым Романом Васильевичем. Составитель отзыва согласен на включение своих персональных данных в аттестационные документы соискателя и их дальнейшую обработку.

Профессор кафедры  
технической кибернетики  
д.ф-м.н.

Скиданов Роман Васильевич

Заведующий кафедрой  
технической кибернетики  
д.т.н., доцент

Куприянов Александр Викторович

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

Адрес: ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086

Телефон: +7 (846) 267-48-43

e-mail: nano@ssau.ru

www.ssau.ru