

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**доктора технических наук, доцента**  
**Одинокова Сергея Борисовича**  
**на диссертацию**  
**Белоусова Дмитрия Александровича**  
**«Разработка и исследование методов и устройств локального контроля**  
**рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток»,**  
**представленную на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук по специальности 01.04.05 – Оптика**

**Актуальность темы**

В настоящее время дифракционные оптические элементы с поверхностным микрорельефом активно применяются для задач сенсорики, в приборостроении, в медицине, для защиты подлинности продукции и во многих других областях. Разнообразие задач создает разнообразие типов дифракционных структур и, как следствие, разнообразие методов изготовления - технология алмазного точения, методы прямой лазерной записи, фотолитографические методы, запись электронным пучком и другие. При этом, процесс формирования на подложке поверхностного микрорельефа, как правило, осуществляется в несколько этапов. Возможность контроля дифракционной структуры на промежуточных этапах позволяет существенно поднять выход годных элементов. В связи с этим, разработка методов и устройств, позволяющих осуществлять промежуточный и финишный контроль параметров изготавливаемых элементов, в зависимости от особенностей микрорельефа поверхностной структуры и от технологического процесса, используемого для его формирования, является актуальной задачей.

**Структура и содержание диссертации**

Представленная диссертационная работа объёмом 178 страниц состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений, списка условных обозначений, списка литературы и трёх приложений. Положительно можно отметить обширный список цитируемой литературы, включающий в себя 229 библиографических ссылок.

Во введении раскрывается актуальность темы диссертации, приводится краткий обзор литературы по проблеме, приведён список основных публикаций автора по теме работы, формулируются цель, основные задачи, научная новизна и практическая значимость диссертационного исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводятся результаты исследования предложенных оптических схем, предназначенных для создания автоматических систем дифрактометрического контроля параметров дифракционных оптических элементов. Представлена общая концепция предложенного технического решения, которая основана на использовании объёмного рассеивающего экрана установленного между исследуемым элементом и системой видеорегистрации дифракционной картины. Это позволяет осуществлять регистрацию дифракционной картины в широком телесном угле дифракции. Проведено исследование различных конфигураций рассеивающего экрана, а именно: полусферического рассеивающего экрана; двух асферических рассеивающих экранов, первый из которых представляет собой сегмент полусферы, а второй сегмент параболоида вращения; оптоволоконного рассеивающего экрана с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским, изготовленного на базе регулярного оптоволоконного жгута. Представлены два оптико-электронных устройства дифрактометрического контроля созданных по результатам проведённого исследования. В первом устройстве при регистрации дифракционной картины в отражённом свете используется полусферический рассеивающий экран, установленный между исследуемым элементом, и четырьмя видеокамерами. Второе устройство создано на базе оптического микроскопа и реализует одновременный визуальный контроль элементов в отражённом свете и дифрактометрический контроль в прошедшем свете. В данном устройстве при регистрации дифракционной картины используется оптоволоконный рассеивающий экран.

Во второй главе представлены два предложенных метода поэтапного и финишного контроля при изготовлении рельефно-фазовых оптических элементов по анализу параметров встроенных тестовых структур. Первый метод предназначен для финишного контроля, при изготовлении элементов

рассчитанных для работы в прошедшем свете в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолета. Контроль в этом случае предлагается осуществлять по анализу дифракционной эффективности в отражённом свете от тестовых решёток с кусочно-непрерывной формой профиля. Второй метод основан на анализе параметров тестовых структур с синусоидальной формой профиля и предназначен для осуществления поэтапного и финишного контроля при изготовлении рельефно-фазовых элементов с использованием технологии растровой полутонковой фотолитографии. Показано, что использование тестовых синусоидальных структур позволяет получать полные характеристические кривые на ключевых этапах растровой полутонковой технологии.

В третьей главе представлены результаты разработки метода предназначенного для количественной оценки характеристик лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур по анализу их микроизображений. Предложенный метод позволяет получать характеристические кривые, как функции технологических параметров, таких параметров, как относительная площадь дефектов исследуемой структуры, прямолинейность и параллельность дорожек, формирующих ее, а также производительность записи. Преимуществом метода является попиксельная обработка микроизображений, что позволяет исследовать структуры со сложной формой границы и исключать дефекты при анализе упорядоченности. Приведены результаты применения разработанного метода для количественной оценки характеристик термохимических лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, записанных на тонких плёнках хрома (толщина 30 нм) и гафния (толщина 15 нм) астигматически сфокусированным фемтосекундным лазерным гауссовым пучком.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В рамках выполнения диссертационного исследования автором получен один акт о внедрении результатов работы и один патент на изобретение.

### **Научная новизна и практическая значимость**

Полученные в диссертационной работе результаты, несомненно, обладают научной новизной и имеют практическую значимость для задач контроля при изготовлении оптических элементов с поверхностным микрорельефом. Предложенные в работе схемы видеорегистрации дифракционной картины в широком телесном угле дифракции с использованием объёмных рассеивающих экранов позволяют создавать автоматические системы дифрактометрического контроля дифракционных оптических элементов с широким диапазоном изменения периодов исследуемых структур, обеспечивая при этом высокую скорость выполняемых измерений. Предложенные методы, основанные на изготовлении и анализе тестовых структур, позволяют упростить процедуру контроля тех классов элементов, для которых они предназначены, и тем самым уменьшить затраты на их изготовление. Разработанный метод количественной оценки характеристик лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур позволяет определять оптимальные параметры записи с целью формирования высокоупорядоченных структур с минимальным количеством дефектов.

**Достоверность полученных результатов** не вызывает сомнений и определяется неоднократным обсуждением результатов работы на международных конференциях и их публикацией в престижных научных журналах. Представленные в работе экспериментальные результаты получены соискателем с применением современных средств и методик измерения. Также можно отметить использование соискателем апробированных программных средств для выполнения теоретического моделирования и обработки экспериментальных результатов.

Результаты диссертации Белоусов Д.А. опубликованы в 29 печатных работах, которые в полной мере отражают основное содержание и выводы диссертационной работы.

## **Замечания**

Несмотря на отмеченную ценность полученных результатов, работа имеет следующие недостатки:

1. В тексте диссертации присутствуют опечатки. Например, в названии таблицы 1.2 присутствует опечатка «...тесовых металл/оксидных решёток...», а на рисунке 3.22б на подписи к оси ординат вместо сокращения «отн. ед.» написано «онт. йод.».
2. В первой главе диссертационной работы представлены результаты исследования схем устройств дифрактометрического контроля с использованием объёмных рассеивающих экранов полусферической и асферической формы, а также с использованием оптоволоконного рассеивающего экрана. В конце данной главы было бы не лишним кратко, возможно в виде таблицы, сравнить плюсы и минусы предложенных схем друг относительно друга.
3. Рисунки 1.26а и 1.26б было бы лучше не разделять на два графика, а сделать один, но представить его в логарифмическом масштабе.

Тем не менее, указанные замечания не снижают ценности полученных результатов и не отменяют сделанных выводов.

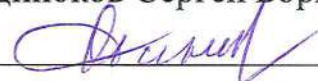
## **Заключение**

Диссертация в целом представляет собой самостоятельную, завершённую научно-квалификационную работу, в которой достигнуты все поставленные цели. Все основные результаты работы являются новыми и соответствуют поставленным задачам. Полученные результаты доказывают положения, выносимые на защиту. Исследование выполнено на высоком научном уровне, что подтверждается достаточным количеством научных статей и участием в международных конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Материалы диссертационной работы достаточно полно опубликованы автором и представлены на ведущих конференциях по тематике исследований. Диссертация соответствует специальности 01.04.05 – Оптика.

соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям («Положение о присуждении ученых степеней», утвержденное Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013). Автор диссертации Белоусов Д. А. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, доцент  
Профессор кафедры «Лазерные  
и оптико-электронные системы»

Одинокоев Сергей Борисович



(подпись)

« 29 » 03 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1  
тел. +7-499-2636344,  
e-mail: [odinokov@bmstu.ru](mailto:odinokov@bmstu.ru)

Подпись Одинокоева С. Б. заверяю

Зам.начальника управления кадров МГТУ имени Н.Э.Баумана



ЗАМ. НАЧАЛЬНИКА  
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ  
НАЗАРОВА О. В.  
ТЕЛ. 8-499-263-60-48