

ОТЗЫВ
официального оппонента 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

Область применения оптических элементов с поверхностной структурой весьма обширна, что вызвано их малыми габаритными размерами и весом, а также их функциональными возможностями по осуществлению преобразований световых полей. Форма микрорельефа данных элементов, как правило, рассчитывается на основе решения обратной задачи преобразования светового поля с заданной комплексной амплитудой с целью получения в определённой области пространства требуемого распределение амплитуды и фазы. При изготовлении, рассчитанная фазовая функция элемента формируется на подложке, для чего используются различные технологические методы записи. Учитывая высокие требования к современным оптическим компонентам запись поверхностной структуры должна осуществляться с высокой точностью. В связи с этим, диссертационная работа Белоусова Д.А., посвященная разработке методов и оптико-электронных систем, предназначенных для осуществления контроля параметров оптических элементов с поверхностной структурой при их изготовлении, **является актуальной**.

Диссертация состоит из оглавления, введения, трёх глав, заключения, списка сокращений, списка условных обозначений, трёх приложений и списка цитируемой литературы, который содержит 229 наименований. Объем диссертации составляет 178 страниц и включает 79 рисунков и 7 таблиц.

Во введении отражена актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи, сформулированы научная новизна, практическая значимость, личный вклад автора и защищаемые положения, приводится список публикаций автора по теме диссертационного исследования.

Первая глава посвящена исследованию схем регистрации дифракционной картины в диапазонах угла дифракции не менее чем $\pm 80^\circ$ и азимутального угла $0^\circ - 360^\circ$ для создания устройств дифрактометрического контроля параметров

дифракционных оптических элементов. Общая концепция разрабатываемых устройств базируется на формировании дифракционной картины от локально освещённого пробным лазерным пучком участка исследуемого элемента на поверхности объёмного рассеивающего экрана, с последующей её видеорегистрацией и анализом. Показано, что при использовании рассеивающего экрана полусферической формы 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. Регистрации дифракционной картины в заявлении угловом диапазоне с помощью одной видеокамеры возможна при использовании рассеивающего экрана, выполненного в форме сегмента параболоида вращения, поверхность которого в угловом диапазоне $\pm 45^\circ$ от оси его симметрии приближена к форме полусфера или при использовании оптоволоконного рассеивающего экрана с одним сферическим вогнутым торцом и вторым плоским. По результатам проведённого исследования с использованием рассеивающего экрана полусферической формы создано устройство дифрактометрического контроля, в котором регистрация дифракционной картины осуществляется в отражённом от исследуемого элемента свете. Также на базе оптического микроскопа создан дифрактометрический стенд для контроля элементов с субмикронными периодами, в котором видеорегистрация дифракционной картины в прошедшем свете осуществляется с поверхности оптоволоконного рассеивающего экрана, изготовленного из оптоволоконной шайбы.

Вторая глава посвящена разработке методов для осуществления контроля рельефно-фазовых оптических элементов на различных этапах их изготовления. Предложены два метода, которые основаны на анализе параметров встроенных тестовых решёток изготавливаемых совместно с рабочей структурой контролируемого элемента. Первый метод предназначен для финишного контроля рельефно-фазовых оптических элементов, расчётная глубина рельефа которых позволяет обеспечить разность фаз $\geq 2\pi$ на рабочей длине волны дальнего ультрафиолетового диапазона в прошедшем свете, и основан на анализе дифракционной эффективности встроенных тестовых линейных решёток с кусочно-непрерывным рельефом в отражённом свете. Для контроля дифракционной эффективности тестовых решёток используется лазерный источник видимого диапазона, что существенно упрощает процедуру контроля

данных элементов. Второй метод предназначен для осуществления поэтапного контроля при изготовлении рельефно-фазовых оптических элементов с применением технологии растровой полутоновой фотолитографии. Данный метод основан на формировании и анализе параметров тестовых синусоидальных решёток, и позволяет осуществлять контроль функции пропускания изготовленного растрового фотошаблона, подбирать оптимальные параметры экспонирования фоторезиста, а также измерять отклонение полученной глубины и формы микрорельефа сформированного в слое фоторезиста или в материале подложки.

Третья глава посвящена разработке 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-индукционных периодических поверхностных структур (ЛИППС), по анализу их микроизображений. Метод основан на анализе карт угловой ориентации пикселей на микроизображении исследуемой структуры. Разработанный метод был применён для количественной оценки параметров термохимических ЛИППС сформированных на плёнках хрома и гафния астигматически сфокусированным гауссовым пучком фемтосекундного лазера с длиной волны 1026 нм. Впервые показано, что при записи термохимических ЛИППС на плёнке гафния (толщина напылённой плёнки 15 нм), дефектность и упорядоченность сформированных структур улучшаются с увеличением скорости сканирования записывающего пучка как минимум до 2000 мкм/с, а производительность записи при этом монотонно возрастает (в диапазоне мощностей записывающего пучка 250–300 мВт). Полученный результат свидетельствует о перспективности гафния для высокопроизводительной записи термохимических ЛИППС с высокой степенью упорядоченности структуры.

В заключении изложены основные результаты работы, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования.

Научная новизна работы, главным образом, заключается в следующем:

- предложены и исследованы схемы устройств дифрактометрического контроля, в которых дифракционная картина от локально освещённой пробным лазерным пучком области исследуемого дифракционного оптического элемента формируется на поверхности объёмного рассеивающего экрана, после чего регистрируется видеокамерой (или несколькими видеокамерами);

- 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.

Результаты диссертационного исследования имеют ярко выраженный прикладной характер, а практическая значимость работы не вызывает сомнений. Предложенные в работе схемы регистрации дифракционной картины в широком угловом диапазоне позволяют создавать автоматические системы для высокоскоростного дифрактометрического контроля параметров дифракционных оптических элементов, что подтверждается созданными в процессе выполнения диссертационной работы устройствами. В работе предложен метод, позволяющий осуществлять финишный контроль при изготовлении рельефно-фазовых оптических элементов рассчитанных для работы в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолетового диапазона на пропускание, с использованием лазерного источника видимого диапазона, что существенно упрощает данную процедуру. Разработанный метод поэтапного контроля при изготовлении рельефно-фазовых оптических элементов с применением растровой полутоновой фотолитографии, основанный на формировании и анализе тестовых синусоидальных решёток, позволяет выявлять источники и величины ошибок на промежуточных стадиях технологического процесса и, тем самым, снизить затраты на изготовление данных элементов. Описанный в диссертационной работе метод количественной оценки характеристик ЛИППС позволяет определять оптимальные параметры для записи высокоупорядоченных решёток с низким уровнем дефектности.

Основные результаты диссертационной работы были представлены на 14 всероссийских и международных конференциях, опубликованы в научных журналах соответствующей тематической направленности и, что особенно важно, подтверждены полученным патентом на изобретение РФ и актом о внедрении. Личный вклад автора в полученные результаты не вызывает сомнений. Он сформулирован ясно, является реальным и существенным.

Замечания по работе:

1. В первой главе рассматриваются различные оптические схемы регистрации дифракционных картин, в которых в качестве основного элемента используются

светорассеивающие экраны различной формы, либо оптоволоконные элементы (шайбы, фоконы). Приводятся результаты измерений дифракционной эффективности исследуемых решеток (в частности на рис. 1.26, стр. 57). При этом из текста диссертации не понятно, как учитывались рассеивающие свойства применяемых экранов, а также зависимость эффективности введения света в волокна при различных углах падения дифрагированного света.

2. В работе предложен метод поэтапного контроля рельефно-фазовых оптических элементов на различных этапах их изготовления. В результате применения разработанного метода удалось уменьшить отклонения формы синтезируемых структур до значений 0,9 – 2,6 %. В работе не дана оценка полученного уровня погрешностей. Чем он ограничен: применяемым методом или другими факторами?

3. В третьей главе описаны результаты экспериментов по записи ТЛИППС в пленках хрома и гафния, показывающие прямо противоположное поведение данных материалов. В пленках хрома лучшие результаты получены на низких скоростях, в пленках гафния – на высоких. Возможно, в работе стоило бы уделить больше внимания объяснению данного эффекта.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают научной и практической ценности полученных результатов.

Заключение.

Диссертация Белоусова Д. А. «Разработка и исследование методов и устройств локального контроля рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток» является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержатся решения актуальных и практически значимых задач. Работа выполнена на высоком научном уровне и свидетельствует о хорошей подготовке автора к исследовательской деятельности. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.05 – «Оптика» по техническим наукам. Автореферат достаточно полно отражает основное содержание работы и основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования.

Диссертация Белоусова Д. А. соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения учёных степеней»,

утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Белоусов Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Официальный оппонент,
кандидат технических наук,
директор федерального
государственного бюджетного
учреждение науки «Конструкторско-
технологический институт научного
приборостроения Сибирского
отделения Российской академии
наук» (КТИ НП СО РАН)

Завьялов Петр Сергеевич
«30» 04 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук» (КТИ НП СО РАН), 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41.

Рабочий телефон: +7 (383) 306-58-95,
e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Подпись Завьялова П.С. заверяю

И.о. ученого секретаря



Завьялова Марина Андреевна

/печать организации/