

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИАиЭ СО РАН

Бабин Сергей Алексеевич

29 октября 2020 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Диссертация «Разработка и исследование методов и устройств локального контроля рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток» выполнена в лаборатории 06 «Дифракционной оптики» ИАиЭ СО РАН.

В 2015 году Белоусов Д. А. окончил с отличием магистратуру Физико-технического факультета в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) по направлению 03.04.02 – «Физика». В 2019 году окончил аспирантуру в ИАиЭ СО РАН по направлению 03.06.01 – «Физика и астрономия», специальность 01.04.05 – «Оптика». Начиная с 2012, является сотрудником лаборатории дифракционной оптики.

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

Диссертация «Разработка и исследование методов и устройств локального контроля рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток» была рассмотрена на межлабораторном объединённом семинаре учебно-научного центра «Квантовая Оптика» 29 октября 2020 года.

На семинаре присутствовали:

Шалагин Анатолий Михайлович, акад. РАН, ИАиЭ СО РАН

Бабин Сергей Алексеевич, чл.-корр. РАН, ИАиЭ СО РАН

Каблуков Сергей Иванович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Шапиро Давид Абрамович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Корольков Виктор Павлович, д.т.н., ИАиЭ СО РАН

Пальчикова Ирина Георгиевна, д.т.н., КТИ НП СО РАН

Чаповский Павел Львович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Фрумин Леонид Лазаревич, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Лобач Иван Александрович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Насыров Руслан Камильевич, к.т.н., ИАиЭ СО РАН

Петров Виктор Валерьевич, к.ф.-м.н., ИЛФ СО РАН

Симонов Виктор Александрович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Завьялова Марина Андреевна, КТИ НП СО РАН

Шиманский Руслан Владимирович, ИАиЭ СО РАН

Куц Роман Игоревич, ИАиЭ СО РАН

и другие сотрудники ИАиЭ СО РАН, всего 24 человека.

По результатам рассмотрения диссертации «Разработка и исследование методов и устройств локального контроля рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток» принято следующее заключение:

Актуальность

В настоящее время дифракционные оптические элементы (ДОЭ) благодаря своим широким функциональным возможностям по преобразованию исходного волнового фронта в волновой фронт с заданными параметрами 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). Следует отметить, что при малой глубине поверхностной структуры, сформированной на подложке, она может служить в качестве маски, формирующей рабочую структуру амплитудных ДОЭ. 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), применяемые в качестве корректоров волнового фронта. На сегодняшний день существует множество методов изготовления РОЭ. Наиболее распространёнными в производственной практике являются: 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 (ЛИППС), которые формируются на поверхности модифицируемого материала под воздействием импульсного лазерного пучка с низкоапертурной фокусировкой, и представляют собой высокоупорядоченные решётки.

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 изготовленного элемента. Методы контроля РОЭ можно условно разделить на четыре основные группы: определение соответствия между измеренной и расчётной 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 вышеперечисленных 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.

Основная цель диссертационного исследования Белоусова Д. А. сформулирована как 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. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- 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;
- разработка дифрактометрического метода финишного контроля РОЭ, предназначенных для работы на пропускание в диапазоне длин волн дальнего ультрафиолета, на основе использования лазерного источника видимого диапазона;

- разработка метода поэтапного контроля РОЭ, изготавливаемых с использованием растровой полутоновой технологии;
- 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.

Личное участие соискателя

В ходе выполнения работ Белоусов Д. А. принимал активное участие в выборе применяемых методов исследования, расчёте, проектировании, сборке и юстировке устройств, представленных в диссертационной работе, проведении экспериментальных и теоретических исследований, разработке программных кодов и алгоритмов для численного моделирования и обработки результатов, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, подготовке научных публикаций по теме исследования. Результаты, представленные в диссертации, получены Белоусовым Д. А. лично. При выполнении диссертационной работы Белоусов Д. А. проявил себя квалифицированным научным сотрудником, способным самостоятельно решать задачи и проводить исследования на высоком научном уровне.

Научная новизна

В диссертации получены следующие основные научные результаты:

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 эллиптического 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 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.

Степень достоверности 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 журналах из перечня ВАК и индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

Практическая значимость

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 ДОО 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 полутоновой 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 важен (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 ЛИПЭС.

Соответствие специальности

Диссертационная работа соответствует специальности 01.04.05 «Оптика», так как тематика и методы исследования соответствуют паспорту специальности в части технических наук.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Результаты работ по теме диссертации были 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.).

Результаты диссертационной работы достаточно подробно отражены в 11 статьях, 10 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus (в том числе 3 статьи в изданиях, включенных в списки ВАК). Количество опубликованных печатных работ в журналах, соответствующих специальности 01.04.05 – «Оптика», в полном объеме удовлетворяет требованиям ВАК РФ на соискание ученой степени кандидата наук:

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. Kutz // 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 ТЛИПСС

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; Опубл. 26.10.2017, Бюл. № 30.

Диссертация «Разработка и исследование методов и устройств локального контроля рельефно-фазовых оптических элементов и амплитудных решёток» Белоусова Дмитрия Александровича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика»

Председатель семинара
Академик РАН



Шалагин А.М.