

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Завьяловой Марины Андреевны на тему:

«Разработка и исследование оптических высокоразрешающих датчиков контроля положения рабочих поверхностей для оперативного управления лазерными технологическими процессами», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Работа М.А. Завьяловой посвящена исследованию и разработке прецизионных оптико-электронных бесконтактных датчиков поверхности для лазерных технологических установок. Применение таких датчиков позволяет позиционировать обрабатываемые поверхности широкого спектра материалов от металлических пленок до оптически прозрачных сред с точностью, необходимой для обеспечения качества синтезируемых микро- и наноструктур, сравнимых с длиной волны лазерного излучения. Коммерчески доступные датчики имеют высокую стоимость, трудно внедряются в лазерные каналы технологических установок, не позволяют контролировать положение криволинейных поверхностей, что в совокупности является сдерживающим фактором их применения. Поэтому потребность в разработке эффективных и доступных датчиков поверхности с разрешением менее 1 мкм, которые могут применяться на различных стадиях лазерных технологических процессов, определяет актуальность исследования.

Структура диссертации и оценка её содержания

Диссертация изложена на 132 страницах, из них 127 страниц основного текста, включая 69 рисунков, 7 таблиц и 6 страниц с приложениями. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы из 87 наименований, списка сокращений и двух приложений.

Во введении отражена актуальность темы исследования, определены цели и задачи работы, сформулированы научная новизна, значимость и обоснованность работы, личный вклад автора и основные защищаемые положения.

В первой главе рассмотрены особенности микро- и наноструктурирования плоских и криволинейных поверхностей с помощью лазерного излучения. Сформулированы технические требования к датчиком контроля положения объектов для установок, осуществляющих прецизионную лазерную обработку различных материалов. Проведен обзор существующих методов оптического контроля положения поверхности. На основании обзора дано обоснование необходимости разработки встраиваемых высокоразрешающих датчиков, позволяющих осуществлять эффективную фокусировку лазерного излучения на различных поверхностях и контролировать результат взаимодействия.

Во второй главе проведено исследование датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко с помощью компьютерного моделирования, установлены его предельные характеристики при контроле положения плоских и криволинейных поверхностей. На основе датчика спроектирован и изготовлен микроскоп записи, который вошел в состав круговых лазерных записывающих систем. Проведены экспериментальные исследования погрешностей данного датчика. Представлены результаты записи дифракционных оптических элементов с использованием данного датчика и показано, что ошибка волнового фронта синтезированных структур не превышает значение $\lambda/100$.

В третьей главе представлены результаты исследования волоконного конфокального датчика на основе хроматического кодирования. Предложены методы расчета гиперхроматических элементов, входящих в состав данного датчика. Исследованы погрешности данного датчика с различными оптическими схемами гиперхроматических элементов и анализаторов цвета.

Представлено практическое применение данного датчика для повышения разрешения ближнепольного терагерцового микроскопа.

В четвертой главе посвящена разработке и экспериментальному применению датчика на основе анализатора волнового фронта Шака-Гартмана для контроля положения оптически прозрачных сред при прямом профилировании их поверхности методом лазерной абляции импульсами пикосекундной длительности. Представлены результаты микропрофилирования кварцевого стекла, кремния и плёнок MgF_2 .

В заключении изложены основные научные и практические результаты работы, полученные в ходе диссертационного исследования.

Диссертационная работа производит хорошее впечатление и представляет собой завершённое научное исследование. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Представленные результаты проведенных теоретических и экспериментальных работ соответствуют паспорту специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

Научная новизна полученных результатов заключена, прежде всего:

- В исследовании влияния положения ножа Фуко на параметры датчика в составе лазерных круговых записывающих систем;
- в методах расчета рефракционно-дифракционных и гиперхроматических объективов, являющихся исполнительными элементами конфокальных датчиков положения поверхности и методах повышения разрешения таких датчиков;
- в методе контроля положения оптически прозрачных сред, позволяющий с высокой точностью определить их скорость абляции для эффективного управления глубиной структур в процессе прямого профилирования лазерным излучением. В частности, в работе:

1. Исследовано влияние положения ножа Фуко и угла наклона обрабатываемой поверхности на предельные характеристики датчика

автоматической фокусировки в составе круговых лазерных записывающих систем.

2. Разработан модифицированный датчик автоматической фокусировки излучения на основе ножа Фуко с расширенным рабочим диапазоном для круговых лазерных записывающих систем, позволяющий контролировать положение плоских и криволинейных поверхностей в зоне наилучшей фокусировки рабочего микрообъектива.

3. Предложены методы расчета рефракционно-дифракционных и гиперхроматических объективов, позволяющих фокусировать белый свет в хроматические отрезки различной длины. Впервые разработан метод повышения разрешающей способности волоконного хроматического конфокального датчика, основанный на применении непрозрачной аподизирующей маски в составе гиперхроматических объективов.

4. Впервые в России создан прототип конфокального прецизионного датчика поверхности, у которого погрешность измерения смещения объекта не превышает 0,2 мкм в пределах линейного диапазона хроматического отрезка, равного 120 мкм. В его состав входит рассчитанный, изготовленный (АО «Новосибирский приборостроительный завод») и экспериментально апробированный автором трехлинзовый гиперхроматический объектив с длиной хроматического отрезка $\Delta z = 300$ мкм и фокусным расстоянием 24 мм для диапазона длин волны 0,4–0,7 мкм.

5. Предложен и исследован высокоточный метод контроля и мониторинга процесса абляции прозрачных сред импульсами пикосекундного лазера на основе датчика Шака-Гартмана, с помощью которого синтезированы микро- и наноструктуры на поверхности кварцевого стекла и кремния и определены оптимальные режимы лазерной обработки.

Защищаемые положения диссертации соответствуют цели и задачам научного исследования. При выполнении работы решены важные научно-

технические задачи создания высокоразрешающих датчиков контроля положения поверхностей для лазерных технологических установок.

Практическая значимость полученных результатов

Разработанными датчиками автоматической фокусировки на основе ножа Фуко были оснащены коммерческие модели круговых лазерных записывающих систем, которые были поставлены в Харбинский институт технологий (КНР, г. Харбин, 2012 г.) и Самарский государственный аэрокосмический университет (Россия, г. Самара, 2014 г.), что подтверждено актами внедрения. Также данные датчики вошли в состав двухканальной круговой лазерной записывающей системы для синтеза микроструктурированных компонентов новой элементной базы оптоэлектронного приборостроения, фотоники и микромеханики для АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (Россия, г. Екатеринбург, 2015 г.) и прецизионного лазерного технологического комплекса для производства оптических шкал, сеток, фотошаблонов и синтезированных голограмм на основе лазерной трехмерной микро- и нанообработки для АО «Новосибирский приборостроительный завод» (Россия, г. Новосибирск, 2015 г.), что также подтверждено актами внедрения.

Разработанный конфокальный датчик на основе метода хроматического кодирования используется в составе сканирующей приставки ближнепольного микроскопа на основе терагерцового лазера на свободных электронах, который создан в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) (приведена справка об использовании результатов диссертации).

Результаты исследований М.А. Завьяловой могут быть использованы в научных институтах и оптико-механических предприятиях Российской Федерации для создания высокотехнологичных лазерных установок,

позволяющих проводить прецизионную обработку широкого спектра материалов и осуществлять контроль синтезированных структур.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечена положительным опытом применения разработанных датчиков в различных лазерных технологических установках, которые внедрены на крупнейших предприятиях Российской Федерации и за рубежом.

Результаты диссертации М.А. Завьяловой в должной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Из 28 научных работ по теме диссертации 6 статей входят в журналы Перечня ВАК РФ, 4 публикации индексируются базами Scopus и Web of Science.

Замечания по работе:

1. Ход лучей на рисунках 2.8 и 2.10 нуждается в коррекции. По-видимому, на них показаны лишь частично лучи света падающего на объект от источника освещения в области между объективом и образцом, но до объектива их ход не показан. Обратный ход лучей света, отраженных от объекта, опять же показан лишь частично, начиная после объектива и не показан между объективом и образцом. Это несколько запутывает понимание принципа работы оптической системы на основе ножа Фуко.

2. Как вычислялась «погрешность измерения смещения»? Как следует из рис. 3.8 за него принималась величина одного среднеквадратического отклонения (СКО) от аппроксимационной кривой, полученная методом наименьших квадратов. Это гарантирует лишь 68,2% получения определяемого значения в указанном интервале. Для вероятности получения результата в указанном диапазоне более 95% необходимо брать не менее двух СКО, что влечет двукратное увеличение в погрешности измерения смещения.

3. В тексте присутствуют незначительные неточности и ошибки, например на рис. 4.10 в подписи под горизонтальной осью необходимо поставить знак деления плотности мощности на 10^{12} , а не умножение,

оптические диапазоны приводятся в разных шкалах 400-700 нм на стр. 69 и 0.4-0.7 мкм на стр. 74, местами попадает текст с меньшим размером шрифта.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертация Завьяловой М.А. является самостоятельной, завершённой исследовательской работой, в которой содержатся новые решения важных научно-технических задач создания высокоразрешающих датчиков контроля положения поверхностей в составе лазерных технологических установок, осуществляющих микрообработку поверхностей различных материалов. На основании этого считаю, что диссертация Завьяловой Марины Андреевны соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК Российской Федерации (Постановление Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Завьялова Марина Андреевна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

Официальный оппонент,

Терентьев Вадим Станиславович

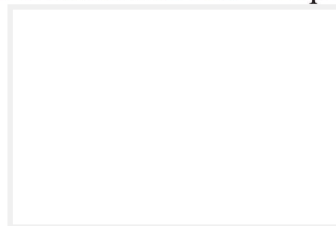
кандидат физико-математических наук,

Старший научный сотрудник

ФГБУН Институт автоматизации и электрометрии Сибирского

отделения Российской академии

Вадим Станиславович Терентьев



наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии
наук (ИАиЭ СО РАН)

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 1

Web: <https://www.iae.nsk.su/ru/>

Телефон: (383) 333-20-03

Адрес электронной почты: terentyev@iae.nsk.su

Подпись В.С. Терентьева заверяю

И.О. ученого секретаря ИАиЭ СО РАН

к.ф.-м.н.

улина



Отзыв получен 27.01.2021. *А.С. Сенин*
С отзывом ознакомлена 28.01.2021 *А.В. Завьялова*