

На правах рукописи



**Завьялова Марина Андреевна**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ  
ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ  
РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ЛАЗЕРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Специальность: 05.11.07

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН).

**Научный руководитель:**

**Чугуй Юрий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, научный руководитель КТИ НП СО РАН.

**Официальные оппоненты:**

**Меледин Владимир Генриевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), лаборатория проблем тепломассопереноса, главный научный сотрудник;

**Терентьев Вадим Станиславович**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН), лаборатория волоконной оптики, старший научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

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

Защита состоится 16 февраля 2021 года в 10:00 часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 212.173.08 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_ декабря 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент



Максим Андреевич Степанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке, исследованию и применению новых методов автоматического контроля положения рабочих поверхностей с высоким разрешением в ходе лазерных технологических процессов с целью формирования и контроля микро– и наноструктур высокого качества с глубиной до нескольких микрометров.

*Актуальность темы диссертационного исследования* обусловлена необходимостью прецизионной лазерной обработки и исследования трехмерных микро– и наноструктур различных материалов, что предъявляет высокие требования к системам позиционирования рабочих элементов. Такие системы осуществляют фокусировку лазерного излучения до сравнимых с его длиной волны размеров. Для этих целей, как правило, используют оптические бесконтактные датчики, которые позволяют с высоким разрешением определить положение поверхности обрабатываемых объектов. Однако коммерчески доступные датчики трудно встраиваются в оптические схемы лазерных технологических комплексов. К тому же их применение ограничивает высокая стоимость. Поэтому важной задачей является разработка и исследование оптических бесконтактных датчиков поверхности, которые позволяют выполнять прецизионное позиционирование исполнительных элементов для формирования микро- и наноструктур высокого качества глубиной до нескольких микрометров с разрешением менее 1 мкм для лазерных технологических комплексов. Такие датчики применяются в лазерных технологических установках для контроля положения обрабатываемых деталей при синтезе высокоточных дифракционных оптических элементов, шкал, лимбов, биочипов для целей микрофлюидики, а также при исследовании объектов с помощью сканирующих зондов, позволяющих преодолеть дифракционный предел.

Задача проектирования таких датчиков усложняется для случаев записи дифракционной структуры на трехмерных поверхностях, что актуально на данном этапе развития высокотехнологичной элементной базы. Для двухканальных вариантов лазерных технологических установок, в которых реализуется сразу несколько технологий записи структур, необходимо увеличить рабочий диапазон до нескольких десятков микрометров. Это связано с тем, что любой микрообъектив имеет хроматическую абберацию и при использовании двух длин волн, например, в видимом и УФ-диапазонах, фокальные плоскости могут быть существенно разнесены.

Альтернативным вариантом решения задачи контроля положения поверхностей и сверхточного позиционирования рабочих элементов является создание ближнепольных микроскопов, в которых дифракционный предел

может быть преодолен за счет введения в область анализа специального зонда, размер острия которого во много раз меньше рабочей длины волны. Это особенно актуально для микроскопов, в которых источником излучения служит терагерцовый лазер с длинами волн от 20 до 240 мкм, поскольку большая длина волны ограничивает их разрешающую способность.

Для разработки технологии прямого профилирования оптических поверхностей методом лазерной абляции сверхкороткими импульсами важным условием является прецизионное позиционирование поверхности образцов в фокусе рабочего микрообъектива, поскольку плотность мощности носит пороговый характер. При этом необходимо избегать оплавления краев структур и появления трещин, которые возможны при достаточно небольшой расфокусировке лазерного пятна. Более того, высокоточное воспроизведение параметров синтезированных структур позволяет определять экспериментальным путем среднюю скорость абляции материала для эффективного управления их глубиной. Несмотря на интенсивное развитие методов лазерной обработки материалов импульсами сверхкороткой длительности, остается малоизученным их влияние на оптически прозрачные среды. Требуется детальное изучение характера взаимодействия такого типа излучения и вещества для каждого конкретного материала.

В связи с вышесказанным разработка методов автоматического контроля положения рабочих поверхностей с высоким разрешением (менее 1 мкм) в ходе лазерных технологических процессов как во время записи, так и после ее завершения без съема образца, представляется актуальной. Это определило выбор темы диссертационного исследования.

### **Цель и задачи диссертации**

Целью работы является разработка, исследование и испытание оптических датчиков контроля положения поверхностей с высоким разрешением для оперативного управления лазерными технологическими процессами: датчика автоматической фокусировки лазерного излучения на основе ножа Фуко для круговых лазерных записывающих систем (КЛЗС), конфокального хроматического датчика и датчика на основе микролинзового раstra для контроля и мониторинга абляции оптически прозрачных материалов.

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние параметров оптической схемы датчика автоматической фокусировки с ножом Фуко на его предельные характеристики в составе круговых лазерных записывающих систем.

2. Разработать высокоразрешающий датчик автоматической фокусировки на основе ножа Фуко для записи дифракционных оптических элементов на плоских и криволинейных поверхностях и создать на ее основе

микроскоп записи с улучшенными характеристиками для промышленных образцов круговых лазерных записывающих систем.

3. Рассчитать и оптимизировать параметры конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования для контроля положения поверхностей обрабатываемых изделий, в котором зондирующее излучение представляет собой хроматические отрезки различной длины (100 – 700 мкм), а длина волны отражённого излучения пропорциональна расстоянию до поверхности.

4. Разработать методику контроля и мониторинга процесса абляции поверхности оптических прозрачных материалов с использованием лазерного излучения с импульсами пикосекундной длительности и установить предельные параметры (среднюю скорость абляции, плотность мощности) при синтезе на их поверхности микро- и наноструктур.

### **Методы исследований**

Результаты исследований, представленные в диссертации, получены путем теоретического анализа, моделирования оптических систем, а так же физических экспериментов с использованием созданных лабораторных стендов и промышленного лазерного технологического оборудования.

### **Научная новизна**

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.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Высокоточный датчик автоматической фокусировки на основе ножа Фуко в составе круговых лазерных записывающих систем позволяет контролировать положение плоских или криволинейных поверхностей в фокальной плоскости рабочего микрообъектива с погрешностью не более  $\pm 0,2$  мкм в диапазоне  $\pm 60$  мкм при наличии достаточно быстрых (до 20–30 Гц) осцилляций поверхности и угле наклона касательной к поверхности до  $8^\circ$ .

2. Волоконный конфокальный датчик на основе метода хроматического кодирования с разработанными гибридными рефракционно-дифракционными объективами и гиперхроматическими объективами позволяет определять положение контролируемых поверхностей с высоким разрешением (погрешность не превышает 0,1 – 1 мкм) на рабочих отрезках от 20 до 225 мкм.

3. Высокоточный метод на основе анализатора волнового фронта Шака-Гартмана для оперативного контроля синтеза микро- и наноструктур на поверхности оптически прозрачных сред с помощью лазерной абляции пикосекундными импульсами позволяет формировать кратеры при плотностях мощности лазерного излучения  $0,57 \times 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> до  $31 \times 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> для кварцевого стекла марки КУ-1 (средняя скорость абляции от  $(23 \pm 4)$  нм до  $(144 \pm 18)$  нм/импульс) и  $0,22 \times 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> до  $0,34 \times 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> для кремния (средняя скорость абляции от  $(3,63 \pm 0,63)$  нм до  $(7,2 \pm 0,2)$  нм/импульс).

#### **Личный вклад**

Представленные в работе результаты получены лично автором и при его непосредственном участии при проведении теоретических и экспериментальных исследований. Им проведены моделирование и оптимизация датчика автоматической фокусировки для лазерных круговых записывающих систем и конфокального датчика с хроматическим кодированием, предложено использовать в качестве датчика поверхности датчик на основе микролинзового раstra. Для волоконных конфокальных датчиков рассчитаны гибридные рефракционно-дифракционные и гиперхроматические объективы, позволяющие формировать хроматические отрезки различной длины (100–700 мкм).

Автор участвовал в сборке, настройке и проведении мероприятий по испытанию и внедрению коммерческих моделей современных круговых лазерных записывающих систем на предприятиях, находящихся как в России, так и за рубежом. Кроме того, автором проделан большой объем работ по созданию экспериментального стенда и отработке технологии модификации прозрачных стекол импульсами пикосекундного лазера.

### **Практическая значимость работы и результаты внедрения**

1. Полученные автором результаты имеют значение для таких направлений оптического приборостроения, как создание прецизионных оптических бесконтактных датчиков положения поверхности и лазерная микрообработка оптических прозрачных сред. Они были использованы при разработке коммерческих моделей круговых лазерных записывающих систем нового поколения, в состав которых вошла оптимизированная версия быстродействующего датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко. Системы 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 (приложение «А»).

2. Создана двухканальная круговая лазерная записывающая система для синтеза микроструктурированных компонентов новой элементной базы оптоэлектронного приборостроения, фотоники и микромеханики. Система находится в эксплуатации в АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (Россия, г. Екатеринбург) с 2015 г. (акт внедрения приведен в приложении «Б»). КТИ НП СО РАН совместно с ИАиЭ СО РАН удостоены золотой медали и диплома I степени в номинации «Лучший инновационный проект (разработка) в области приборостроения, отечественной элементной базы, отечественных компьютеров и комплектующих» (XXII Международная выставка-конгресс «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (HI-TECH 2016), 15–17 марта 2016 г., г. Санкт-Петербург, Россия).

3. Разработан прецизионный лазерный технологический комплекс для производства оптических шкал, сеток, фотошаблонов и синтезированных голограмм на основе лазерной трехмерной микро- и нанообработки, который поставлен в АО «Новосибирский приборостроительный завод» (Россия, г. Новосибирск, 2015 г.), что подтверждено актом внедрения в приложении «Б». КТИ НП СО РАН совместно с ИАиЭ СО РАН получен диплом II степени за лучшую отечественную разработку в области лазерной аппаратуры и лазерно-оптических технологий в номинации «Лазерные технологические комплексы и технологии для обработки промышленных материалов» (11-я международная

специализированная выставка лазерной, оптической и оптоэлектронной техники «Фотоника. Мир лазеров и оптики – 2016», г. Москва, 2016 г.).

4. Разработанный конфокальный датчик на основе метода хроматического кодирования вошел в состав сканирующей приставки для ближнепольного сканирующего оптического 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) (справка об использовании результатов диссертации приведена в приложении «А»).

#### **Апробация работы**

Результаты диссертации докладывались на следующих международных и отечественных конференциях: Siberian Synchrotron Radiation Center (Novosibirsk, Russia, 2010); 9-я междунар. конф. «Прикладная оптика» (г. Санкт-Петербург, 2010 г.); VII междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск, 2011 г.); 10-я междунар. конф. «ГолоЭкспо» (г. Москва, 2013 г.); VI International symposium «Modern problems of laser physics» (Novosibirsk, 2013); X междунар. науч. конгр. и выст. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: междунар. науч. конф. «СибОптика» (г. Новосибирск, 2014 г.); молодеж. конкурс-конф.: «Фотоника и оптические технологии» (г. Новосибирск, 2014 г.); X междунар. науч. конгр. и выст. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: междунар. науч. конф. «СибОптика» (г. Новосибирск, 2014 г.); XX нац. конф. по использованию синхротронного излучения (г. Новосибирск, 2014 г.); 11th IMEKO symposium «Laser metrology for precision measurement and inspection in industry» (Tsukuba, Japan, 2014); 16th Intern. conf. «Laser Optics» (St.-Petersburg, Russia, 2014); EOS conf. at the World of Photonics cong. (Munich, Germany, 2015); XI междунар. науч. конгр. и выст. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: междунар. науч. конф. «СибОптика» (г. Новосибирск, 2015 г.); 17th International Conference «Laser Optics» (St. Petersburg, 2016); XIII–XV междунар. науч. конгр. и выст. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: междунар. науч. конф. «СибОптика» (г. Новосибирск, 2017–2019 гг.); V междунар. конф. и молодеж. школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (г. Самара, 2019 г.).

#### **Публикации**

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 28 научных работах, из них работ, опубликованных согласно перечню ВАК российских рецензируемых научных журналов – 6, работ в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science – 4, а также 21 публикация в трудах международных и отечественных конференций.



## Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы из 87 наименований, списка сокращений и 2 приложений. Диссертация изложена на 132 страницах печатного текста и содержит 69 рисунков и 7 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи диссертации, новизна и практическая значимость полученных результатов, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе**, имеющей обзорный характер, описываются особенности технологических установок для микроструктурирования оптических прозрачных сред. Показано, что для прецизионной обработки требуются высокоразрешающие оптические бесконтактные датчики поверхности, позволяющие контролировать размер и форму сфокусированного лазерного пучка. Проведен обзор принципов работы коммерчески доступных датчиков положения. Сформулированы основные технические требования к таким датчикам.

**Вторая глава** посвящена исследованию датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко (ДАФ) и исследованию влияния параметров оптической схемы на его предельные характеристики в составе круговых лазерных записывающих систем (КЛЗС). Проведено моделирование оптической схемы датчика в программном пакете для расчета и проектирования оптических систем Zemax. Модель двухэлементного фотоприемника была реализована путем специальной программной расшифровки дифракционного изображения с помощью инструмента Diffraction Image Analysis, в котором для вычисления изображения на выходе оптической системы используется функция Optical Transfer Function (OTF) (рисунок 1).

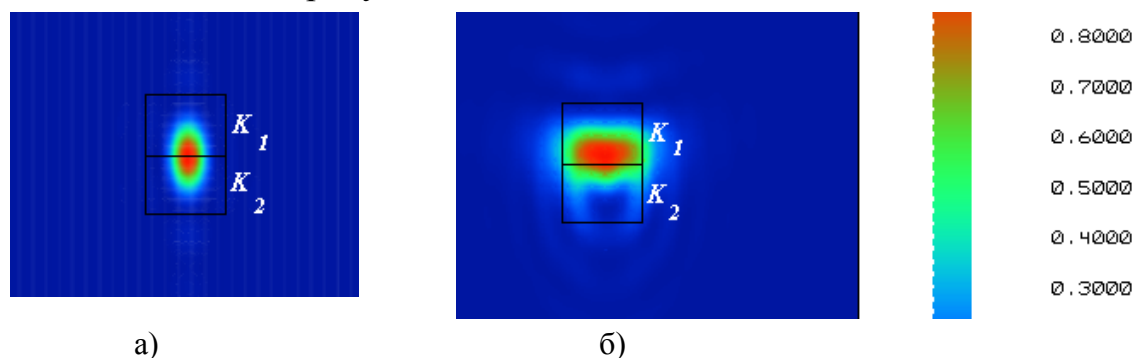


Рисунок 1 – Дифракционные изображения пятна в плоскости двухэлементного фотоприемника при нулевой расфокусировке (а) и при расфокусировке 6 мкм (б)

В результате моделирования выявлено влияние на рабочий диапазон  $\Delta z_{af}$  положения ножа Фуко, а именно расстояния  $L$  между ножом и рабочим микрообъективом (рисунок 2). Установлено, что в случае фокусировки отраженного от поверхности заготовки излучения в плоскости ножа Фуко происходит инверсия зависимости сигнала на двухэлементном фотоприемнике

от смещения поверхности (при смещениях более 100 мкм), что приводит к ошибочному определению направления смещения.

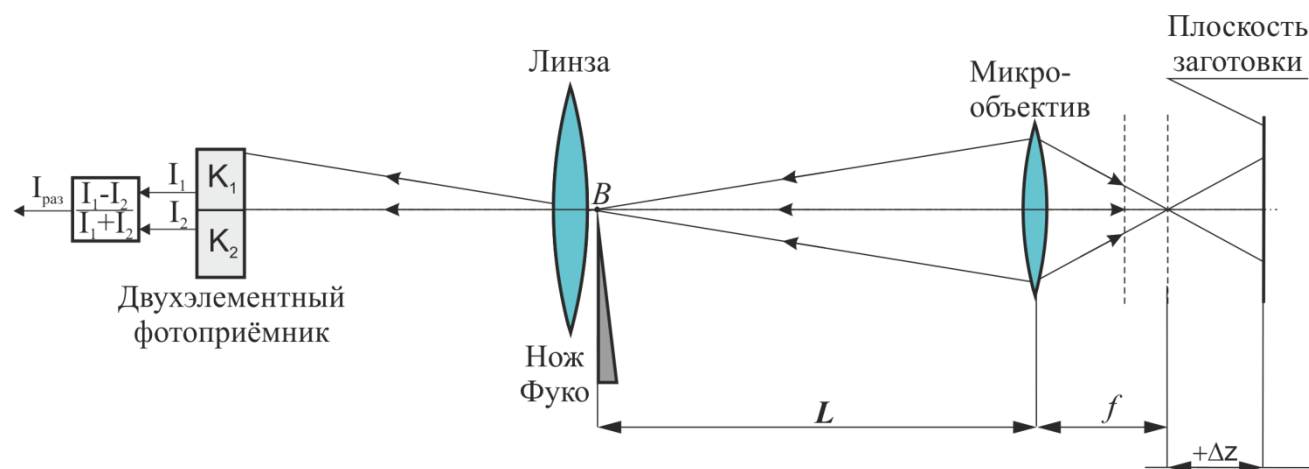


Рисунок 2 – Оптическая схема датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко (после микрообъектива показан обратный ход лучей) при смещении плоскости заготовки от фокальной плоскости микрообъектива  $\Delta z$  более 100 мкм

Выявлен критический угол наклона поверхности для микрообъектива с числовой апертурой 0,65, равный  $8^\circ$ , при котором происходит инверсия разностного графика. Это дает ошибочный сигнал смещения поверхности, что может привести к столкновению рабочего микрообъектива с поверхностью заготовки.

На основании результатов, полученных в ходе программного моделирования оптической схемы ДАФ в программе Zemax, был спроектирован микроскоп для оптического канала записи круговой лазерной записывающей системы, предназначенный для автоматической фокусировки выходного записывающего пучка в пятно диаметром порядка 0,5 мкм, а также для обеспечения визуализации и контроля записи при тестировании светочувствительного материала.

В конце главы представлены технические характеристики КЛЗС с использованием ДАФ на основе ножа Фуко.

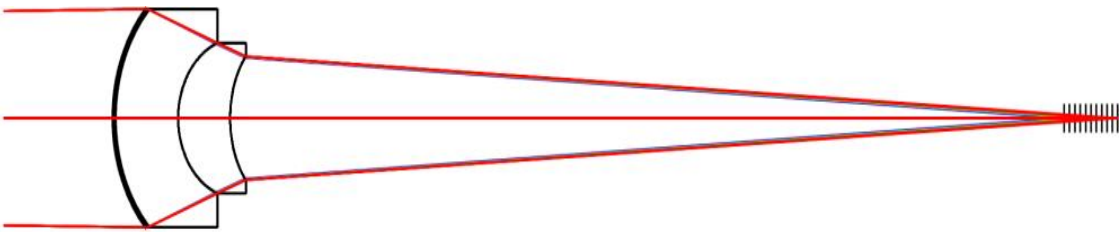
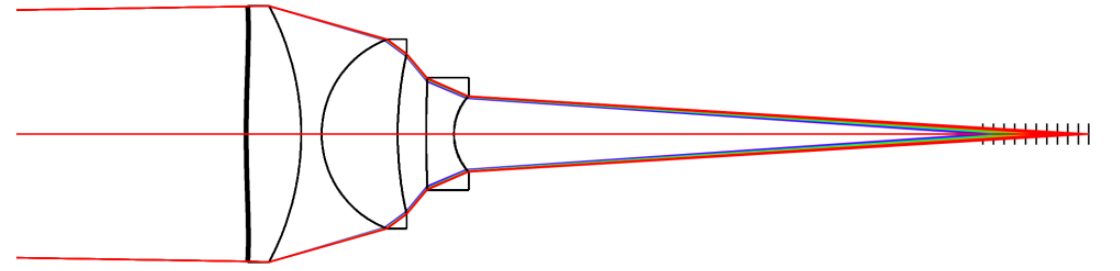
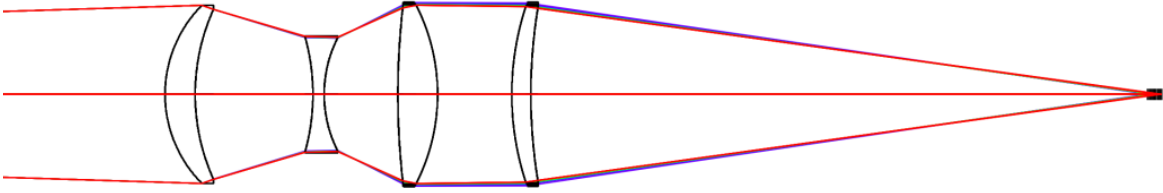
В **третьей главе** описаны разработанные методы расчета рефракционно-дифракционных и гиперхроматических объективов (ГХО), являющихся главными исполнительными элементами волоконных конфокальных датчиков на основе метода хроматического кодирования. Сформулированы общие требования к оптическим схемам таких объективов. Представлен способ расчета фокусного расстояния ДОЭ для получения хроматического отрезка заданной длины при использовании микрообъективов с увеличениями 10, 20 и  $40\times$ .

Используя описанные в диссертационной работе подходы и требования к гиперхроматическим объективам, был рассчитан ряд оптических схем объективов для диапазона длин волн 0,4–0,7 мкм. Оптические схемы ГХО и их основные характеристики представлены в таблице 1. В ней представлены три

варианта: ГХО-склейка; трехлинзовый и четырехлинзовый ГХО (жирными линиями отмечены асферические поверхности).

Из анализа таблицы 1 следует, что применение двух марок стекол позволяет существенно снизить нелинейность гиперхроматического объектива. При этом установлено, что отношение  $\frac{\Delta z}{f}$  составляет 2,5 %. Показано, что для формирования хроматического отрезка достаточно стекол двух марок – SF3 и LAK10 при условии, что одна из поверхностей будет асферической для компенсации сферической аберрации. В более сложном варианте гиперхроматического объектива (трехлинзовый ГХО) используются три марки стекол – KZFS2, FK5, LASF35.

Таблица 1 – Оптические схемы гиперхроматических объективов и их основные характеристики

ГХО-склейка	
	<p>ГХО1: <math>\frac{\Delta z}{f} = 5 \%</math>; <math>\frac{f}{D} = 9</math>; нелинейность 2,5 %          Марки используемых стекол: SF3, LAK10</p>
Трехлинзовый ГХО	
	<p>ГХО2: <math>\frac{\Delta z}{f} = 10 \%</math>; <math>\frac{f}{D} = 7</math>; нелинейность 1 %          Марки используемых стекол: KZFS2, FK5, LASF35</p>
Четырехлинзовый ГХО	
	<p>ГХО3: <math>\frac{\Delta z}{f} = 2,5 \%</math>; <math>\frac{f}{D} = 3,4</math>; нелинейность 1,1 %          Марки используемых стекол: LAK31, SF6HT, SF11</p>

При этом, как показывают расчеты, нелинейность не превышает 1 %. Однако в этом случае возрастает себестоимость ГХО. В четырехлинзовом ГХО используются также три марки стекол, количество элементов возрастает до четырех при нелинейности 1,1 %. Одна из особенностей предложенного подхода заключается в возможности масштабирования оптической системы ГХО, позволяющей получать хроматические отрезки  $\Delta z$  различной длины (используя любую из приведенных выше оптических схем ГХО и исходя из требований специфических применений).

Теоретически и экспериментально показано, что применение в качестве анализатора спектра цветной видеокамеры, а также рефракционно-дифракционного объектива в конфокальных датчиках позволяет определять положение контролируемой поверхности с погрешностью до 0,1 мкм на экспериментально установленном линейном участке графика зависимости доминирующей длины волны от смещения поверхности, равном 20 мкм.

Впервые предложен способ повышения разрешающей способности волоконного хроматического конфокального датчика, основанный на применении непрозрачной аподизирующей маски в составе гиперхроматического объектива. Она позволяет минимизировать влияние широкого спектра, проходящего через центральную часть ГХО. В ходе экспериментальных исследований показано, что применение таких масок в составе гиперхроматического объектива позволяет уменьшить в три раза ширину спектрального распределения выходного сигнала при падении его уровня в 2,5 раза.

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 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.

На основе конфокального датчика создана сканирующая приставка для ближнепольного терагерцового сканирующего оптического микроскопа с блоком нарушенного полного внутреннего отражения и лазером на свободных электронах в качестве источника излучения, которые разработаны в ИЯФ СО РАН.

В **четвертой главе** впервые предложен и реализован метод на основе анализатора волнового фронта Шака-Гартмана для контроля положения, визуализации и определения средней скорости абляции оптически прозрачных

сред. Суть метода заключается в регистрации изменения радиуса кривизны отраженного от поверхности излучения в случае ее смещения или модификации (рисунок 3).

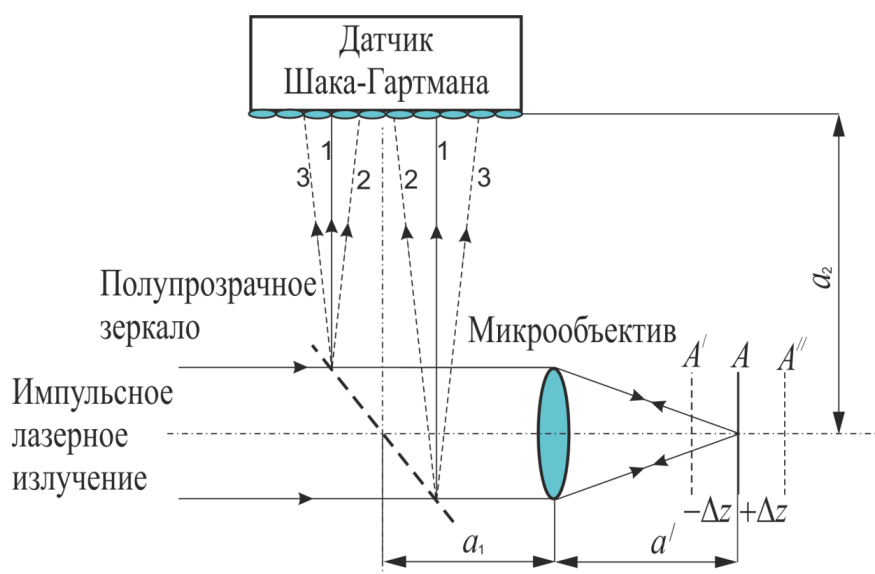
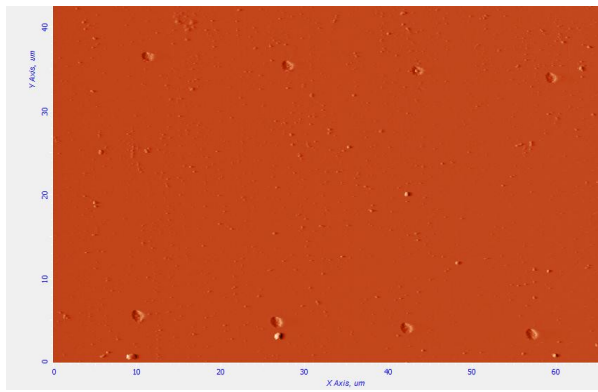


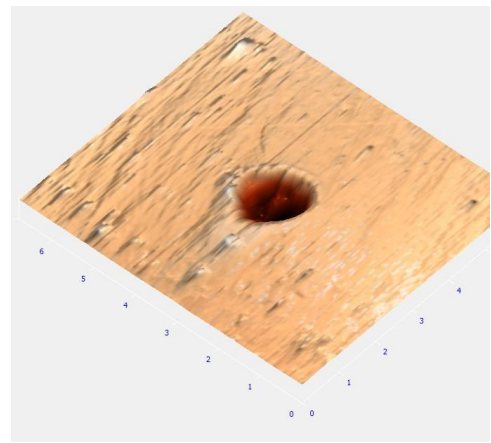
Рисунок 3 – Принципиальная оптическая схема определения плоскости наилучшей фокусировки лазерного пучка на основе датчика Шака-Гартмана

Показано, что погрешность определения смещения поверхности не превышает 0,1 мкм. На основе анализа изображения, формируемого датчиком Шака-Гартмана, установлено, что при модификации поверхности мощным излучением имеет место искажение волнового фронта отраженного излучения. Это позволяет установить экспериментальным путем плотность мощности, при которой поверхность оптически прозрачных сред меняет свою структуру.

Разработан лазерный стенд для отработки технологии микро- и наноструктурирования поверхности оптически прозрачных сред импульсами пикосекундной длительности с использованием анализатора волнового фронта Шака-Гартмана. Представлены результаты выполненных экспериментальных исследований по абляции оптически прозрачных сред: оптического кварцевого стекла, пленок  $MgF_2$  и кремния, которые свидетельствуют о высоком качестве обработки поверхности. На рисунке 4, а приведено трехмерное изображение матрицы кратеров, полученное с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ-изображение), а на рисунке 4, б – увеличенное АСМ-изображение одиночного кратера.



а)



б)

Рисунок 4 – АСМ-изображения кратеров в кварцевом стекле, полученных с помощью лазерной абляции при плотности мощности  $3,2 \times 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>: а) матрица кратеров; б) одиночный кратер. Размеры кратеров: диаметр 1,8 мкм, высота 34 нм

Продемонстрирована трехмерная микрообработка оптических прозрачных сред (кремния) путем прямого профилирования поверхности пикосекундным лазерным УФ-лучом (рисунок 5).

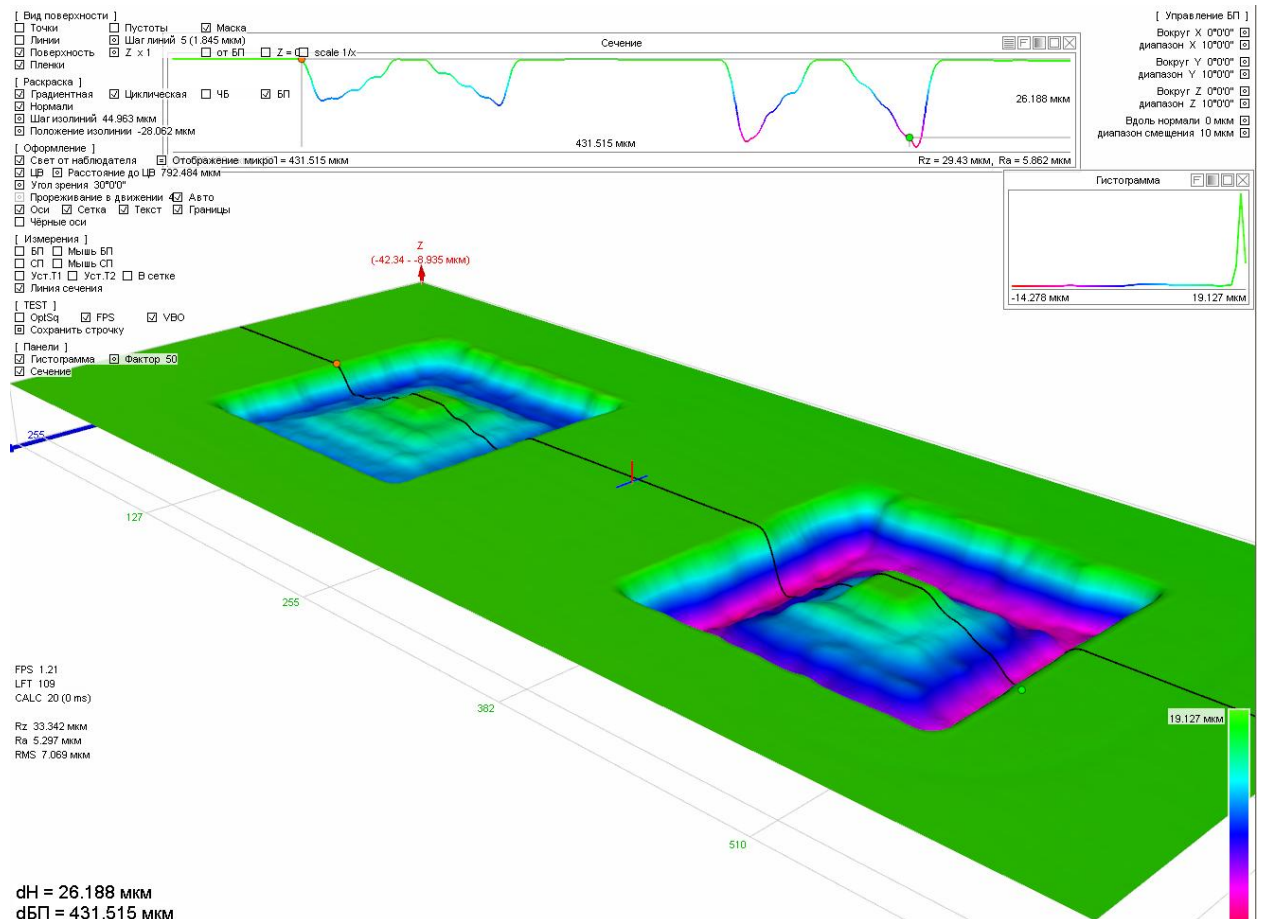


Рисунок 5 – Изображение многоуровневых структур, полученных в кремнии методом прямого микропрофилирования с помощью «холодной» абляции импульсами пикосекундной длительности

На основе измерения геометрических параметров кратеров экспериментально определена средняя скорость абляции (таблица 2), диапазон которой составил от  $23 \pm 4$  нм/импульс до  $144 \pm 18$  нм/импульс. Знание этого параметра дает возможность управлять глубиной микро- и наноструктур при синтезе дифракционных оптических элементов.

Таблица 2 – Средняя скорость абляции кварцевого стекла

$W$ (эксперимент), Вт/см <sup>2</sup>	Средняя скорость абляции, нм/импульс
$0,57 \times 10^{12}$	$23,6 \pm 4,2$
$1,81 \times 10^{12}$	$30,81 \pm 4,63$
$3,23 \times 10^{12}$	$39,09 \pm 6,9$
$14,82 \times 10^{12}$	$61,5 \pm 4,94$
$31,07 \times 10^{12}$	$144,67 \pm 18,02$

Исследования синтезированных структур были выполнены в ЦКП «Прикладная физика» ОПФ НИЧ НГУ на атомно-силовом микроскопе Nt-Mdt Integra Prima HD, а также на интерференционном микроскопе-нанопрофилометре (КТИ НП СО РАН).

**Заключение** содержит формулировку результатов данной работы, а в приложениях представлены результаты внедрения.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе решена задача разработки, создания, исследования и внедрения высокоразрешающих оптико-электронных датчиков поверхности для лазерных технологических установок: датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко, волоконного конфокального датчика на основе хроматического кодирования и датчика на основе анализатора волнового фронта Шака-Гартмана.

Исследовано влияние параметров оптической схемы датчика автоматической фокусировки с ножом Фуко на его предельные характеристики в составе круговых лазерных записывающих систем. С помощью компьютерного моделирования в ПО Zemax Optical Studio получены аналитические сигналы с такого датчика в зависимости от расстояния до поверхности и наклона поверхности образца, показано их влияние на рабочий диапазон датчика.

Разработан высокоразрешающий датчик автоматической фокусировки на основе ножа Фуко для записи дифракционных оптических элементов на плоских и криволинейных поверхностях и на его основе создан микроскоп записи с улучшенными характеристиками для промышленных образцов круговых лазерных записывающих систем. В результате испытаний датчика установлено, что погрешность определения положения обрабатываемой поверхности не превышает 0,2 мкм, а ошибка волнового фронта синтезированных структур – не более  $\lambda/100$ .



Рассчитаны и оптимизированы параметры конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования для контроля положения поверхностей обрабатываемых изделий. Предложены и исследованы оптические системы для формирования продольных хроматических отрезков различной длины. Разработаны методы расчета таких систем, а также способы повышения разрешающей способности датчика за счет применения непрозрачной аподизирующей маски в их составе. Экспериментально показано, что рефракционно-дифракционный объектив вкупе с цветной видеокамерой позволяет определить смещения объекта с погрешностью от 0,1 до 1 мкм на линейных участках хроматического отрезка в диапазоне 20–200 мкм.

Впервые в России в рамках импортозамещения создан прототип высокоразрешающего конфокального датчика поверхности (погрешность измерения смещения объекта не более 0,2 мкм). В его состав входит рассчитанный, изготовленный и экспериментально апробированный трехлинзовый гиперхроматический объектив с длиной хроматического отрезка 300 мкм и фокусным расстоянием 24 мм.

Разработана методика контроля и мониторинга процесса абляции поверхности оптических прозрачных материалов на основе анализатора волнового фронта Шака-Гартмана. Погрешность измерения расстояния до поверхности не превышает 0,1 мкм. На его основе создан лазерный стенд для микро- и наноструктурирования поверхности оптически прозрачных сред пикосекундными импульсами.

Получены экспериментальные зависимости глубины абляции и диаметров кратеров от плотности мощности лазерного излучения. АСМ-изображения кратеров позволили определить оптимальные режимы пикосекундной лазерной обработки. Впервые определена средняя скорость абляции оптически прозрачных материалов (кварцевого оптического стекла и кремния) при облучении поверхности одиночным импульсом.

**Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены:**

*В работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК):*

1. Разработка конфокального датчика 3D поверхности на основе метода дифракционного хроматического кодирования для целей терагерцовой спектроскопии / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, Б. А. Князев, М. А. Макаров, М. Ф. Ступак // Сибирский физический журнал. – 2010. – Т. 5. – № 4. – С. 117–122.

2. Разработка и изготовление ближнепольного терагерцового сканирующего оптического микроскопа с блоком нарушенного полного внутреннего отражения / В. П. Барсуков, А. Г. Верхогляд, В. В. Герасимов, И. С. Глебус, М. А. Завьялова, Б. А. Князев, С. Н. Макаров, М. Ф. Ступак, В. К. Овчар, Д. Г. Родионов, Ю. Ю. Чопорова, В. Ю. Штатнов // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 5. – С. 68–76. – DOI : 10.7868/S0032816214040144.



Переводная версия журнала входит в базу данных Scopus: A terahertz scanning near-field optical microscope with an attenuated total internal reflection module / V. P. Barsukov, A. G. Verhoglyad, V. V. Gerasimov, I. S. Glebus, M. A. Zavyalova, S. N. Makarov, M. F. Stupak, V. Y. Shtatnov, B. A. Knyazev, V. K. Ovchar, D. G. Rodionov, Y. Y. Choporova // Instruments and Experimental Techniques. – 2014. – Т. 57. – № 5. – С. 579–586. – DOI: 10.1134/S0020441214040125.

3. Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, А. Е. Качкин, С. А. Кокарев, В. П. Корольков // Датчики и системы. – 2015. – № 9-10. – С. 45–52.

4. Завьялова, М. А. Поверхностная модификация кварцевого стекла импульсами пикосекундного лазера / М. А. Завьялова // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40. – № 6. – С. 863–870. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-863-870.

5. Завьялова, М. А. Моделирование и расчет гиперхроматических объективов для волоконных конфокальных датчиков поверхности на основе метода хроматического кодирования / М. А. Завьялова, П. С. Завьялов // Фотоника. – 2017. – № 5 (65). – С. 80–90. – DOI: 10.22184/1993-7296.2017.65.5.80.90.

6. Завьялова, М. А. Повышение разрешения волоконного конфокального датчика поверхности на основе метода хроматического кодирования / М. А. Завьялова, П. С. Завьялов, А. Г. Елесин // Приборы. – 2018. – № 11. – С. 1–5.

*Научные результаты диссертации отражены также в следующих рецензируемых научных изданиях:*

7. Optical measuring and laser technologies for scientific and industrial applications / Yu. V. Chugui, A. G. Verkhoglyad, P. S. Zavyalov, E. V. Sysoev, R. V. Kulikov, I. A. Vykhristyuk, M. A. Zavyalova, A. G. Poleshchuk, V. P. Korolkov // Int. J. of Automation Technology. – 2015. – Vol. 9. – № 5. – P. 515–524.

*Результаты диссертационных исследований докладывались на международных и всероссийских научных конференциях:*

8. Development of confocal 3D surface sensor based on the diffraction – chromatic coding method for the purpose of spectroscopic measurements / A. G. Verhoglyad, M. A. Zavyalova, B. A. Knyazev, S. N. Makarov, M. F. Stupak // Digest reports of International Symposium «Terahertz Radiation: Generation and Application» (Published by Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS. Siberian Synchrotron Radiation Center, July 26–29, 2010, Novosibirsk, Russia). –Novosibirsk, 2010. – P. 75.

9. Верхогляд, А. Г. Разработка конфокального датчика поверхности на основе метода дифракционного хроматического кодирования / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова // Прикладная оптика – 2010 : тр. 9-й Междунар. конф.

«Прикладная оптика – 2010» (Санкт-Петербург, 18–22 октября 2010 г.). – Т. 1 (2). Оптическое приборостроение. – СПб. : Оптическое общество им. Д. С. Рождественского, 2010. – С. 251–256.

10. Особенности построения ближнепольной сканирующей приставки для терагерцового спектрометра нарушенного полного внутреннего отражения / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, Б. А. Князев, С. Н. Макаров, М. Ф. Ступак // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгресс «ГЕО-Сибирь-2011» : сб. материалов (Новосибирск, 19–29 апр. 2011 г.). – Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч. 1. – Новосибирск : Изд-во СГГА, 2011. – С. 73–78.

11. Концепция построения ближнепольной сканирующей приставки для терагерцового спектрометра нарушенного полного внутреннего отражения / А. Г. Верхогляд, В. В. Герасимов, М. А. Завьялова, Б. А. Князев, С. Н. Макаров, М. Ф. Ступак // Оптико-информационные измерительные и лазерные технологии и системы : юбилейный сб. избр. тр. КТИ НИ СО РАН. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2012. – С. 409–427.

12. Двухканальная круговая лазерная записывающая система для изготовления дифракционных и микрооптических элементов / А. Г. Верхогляд, В. П. Корольков, С. А. Кокарев, Л. Б. Касторский, А. Г. Полещук, М. А. Завьялова, А. Е. Качкин, Р. В. Шиманский // Голография. Наука и практика : сб. тр. 10-й Междунар. конф. «ГолоЭкспо-2013» (Москва, 17–18 сент. 2013 г.). – М., 2013. – С. 186–191.

13. Advances in optics and photonics in the terahertz region at SPIN workstation of Novosibirsk free electron laser facility / B. A. Knyazev, I. A. Azarov, V. S. Cherkassky, Yu. Yu. Choporova, V. V. Gerasimov, Ya. V. Getmanov, E. V. Grigorieva, M. A. Dem'yanenko, D. G. Esaev, A. K. Kaveev, I. N. Kotelnikov, V. N. Kruchinin, M. V. Kruchinina, V. V. Kubarev, G. N. Kulipanov, M. S. Mitkov, L. A. Mostovich, A. K. Nikitin, P. A. Nikitin, I. G. Palchikova, V. S. Pavelyev, D. G. Rodionov, S. V. Rykhlytsky, T. V. Salikova, M. A. Scheglov, O. A. Shevchenko, V. A. Shvets, S. S. Serebnyakov, D. A. Skorokhod, M. F. Stupak, N. A. Vinokurov, M. G. Vlasenko, V. B. Voloshinov, M. A. Zavyalova, G. N. Zhizhin // Modern problems of laser physics (MPLP-2013) : VI International symposium (Novosibirsk, 25–31 Aug., 2013) : technical digest. – Novosibirsk, 2013. – P. 97–98.

14. Верхогляд, А. Г. Датчик автоматической фокусировки для круговых лазерных записывающих систем / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, В. П. Корольков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014 : X Междунар. науч. конгр. и выст. (Новосибирск, 8–18 апр. 2014 г.) ; Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. – Новосибирск, 2014. – Т. 1. – С. 117–122.

15. Ближнепольная сканирующая приставка для терагерцового микроскопа с блоком нарушенного полного внутреннего отражения / А. Г. Верхогляд, В. В. Герасимов, М. А. Завьялова, Б. А. Князев, С. Н. Макаров, Д. Г. Родионов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014 : X Междунар. науч. конгр. и выст. (Новосибирск, 8–18 апр. 2014 г.) ; Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. – Новосибирск, 2014. – Т. 1. – С. 49–54.

16. Разработка и изготовление ближнепольного терагерцового сканирующего микроскопа с блоком нарушенного полного внутреннего отражения / А. Г. Верхогляд, В. В. Герасимов, М. А. Завьялова, Б. А. Князев, С. Н. Макаров, Д. Г. Родионов // Фотоника и оптические технологии : молодеж. конкурс-конф. (Новосибирск, 14–16 апр. 2014 г.) : сб. материалов. – С. 53–54.

17. Разработка и изготовление ближнепольного терагерцового сканирующего оптического микроскопа с блоком нарушенного полного внутреннего отражения / В. П. Барсуков, А. Г. Верхогляд, В. В. Герасимов, И. С. Глебус, М. А. Завьялова, Б. А. Князев, С. Н. Макаров, М. Ф. Ступак, В. К. Овчар, Д. Г. Родионов, Ю. Ю. Чопорова, В. Ю. Штатнов // XX Нац. конф. по использованию синхротронного излучения «СИ-2014» : (Новосибирск, 7–10 июля 2014 г.) : кн. тез. – Новосибирск, 2014. – С. 58–59.

18. Optical measuring and laser technologies for scientific and industrial applications [Electronic resource] / Yu. V. Chugui, A. G. Verkhoglyad, P. S. Zavyalov, E. V. Sysoev, R. V. Kulikov, M. A. Zavyalova, A. G. Poleshchuk, V. P. Korolkov // Laser metrology for precision measurement and inspection in industry «LMPMI 2014» : 11th IMEKO symposium (Tsukuba, Japan, 2–5 Sept., 2014). – A26. – URL : <http://192.168.0.4/local/LMPMI/proceedings.html> (дата обращения : 13.10.2014).

19. Near-field terahertz scanning optical microscope with frustrated total internal reflection module [Electronic resource] / A. G. Verhoglyad, V. V. Gerasimov, M. A. Zavyalova, B. A. Knyazev, S. N. Makarov, M. F. Stupak, D. G. Rodionov, Yu. Yu. Choporova // Laser Optics 2014 : The 16-th Intern. conf. (St. Petersburg, Russia, 30 June – 4 July, 2014) : Seminar on Terahertz Photonics. – CD-ROM.

20. Laser systems and technologies for manufacturing of micro-optical and diffractive elements on spherical surfaces [Electronic resource] / V. P. Korolkov, A. G. Verhoglyad, S. A. Kokarev, L. B. Kastorsky, M. A. Zavyalova, A. G. Poleshchuk, N. G. Mironnikov, A. E. Kachkin, R. V. Shimansky, D. I. Derevyanko, V. V. Shelkovnikov // WPC 2015 : EOS conf. at the World of Photonics cong. (Munich, 22–24 June, 2015). – URL : <https://www.conftool.com/wpc2015>.

21. Круговая лазерная записывающая система для изготовления ДОЭ на сферических поверхностях / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, Л. Б. Касторский, А. Е. Качкин, С. А. Кокарев, В. П. Корольков, О. Ю. Моисеев, А. Г. Полещук, Р. В. Шиманский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015 : XI Междунар. науч. конгр. и выст. (Новосибирск, 13–25 апр. 2015 г.) ; Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. – Новосибирск, 2015. – Т. 2. – С. 62–68.

22. Verkhoglyad, A. G. Ablation of optical transparent materials using picosecond laser pulses / A. G. Verkhoglyad, M. A. Zavyalova, M. F. Stupak. // 17th International Conference «Laser Optics 2016» (St. Petersburg, June 27 – July 1, 2016) : Technical Program. – St. Petersburg, 2016. – P. 54.

23. Zavyalova, M. A. Ablation of optical transparent materials using picosecond laser pulses / M. A. Zavyalova, A. G. Verkhoglyad, M. F. Stupak // Modern problems of laser physics (MPLP-2016) : The VII International Symposium and Young Scientists School. – 2016. – С. 256.

24. Особенности модификации кварцевого стекла импульсами пикосекундного лазера / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, А. В. Солдатенко, М. Ф. Ступак // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017 : XIII Междунар. науч. конгр. и выст. (Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г.) ; Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. – Новосибирск, 2017. – Т. 1. – С. 136–141.

25. Завьялова, М. А. Структурирование оптических прозрачных сред импульсами пикосекундного лазера / М. А. Завьялова, А. В. Мерещук // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018 : XIV Междунар. науч. конгр. (Новосибирск, 23–27 апр. 2018 г.) ; Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018» : сб. материалов в 2 т. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – Т. 2. – С. 244–255.

26. Завьялова, М. А. Особенности проектирования оптических прецизионных датчиков положения для оперативного контроля лазерного синтеза микро- и наноструктур / М. А. Завьялова, П. С. Завьялов, М. В. Савченко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019 : XV Междунар. науч. конгр. и выст. (Новосибирск, 24–26 апр. 2019 г.) ; Междунар. науч. конф. «СибОптика-2019» : сб. материалов в 9 т. – Новосибирск, 2019. – Т. 9. – С. 139–148. – DOI : 10.33764/2618-981X-2019-8-139-148

27. Перспективы создания лазерного нанолитографа для задач дифракционной оптики и нанофотоники / В. П. Корольков, Р. В. Шиманский, В. Н. Хомутов, А. Г. Седухин, Р. К. Насыров, В. П. Кирьянов, А. В. Кирьянов, М. А. Завьялова // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2019) : V Междунар. конф. и молодеж. шк. (Самара, 21–24 мая 2019 г.) : сб. тр. – Самара, 2019. – С. 283–290.

28. Prospects for creating a laser nanolithography system for tasks of diffractive optics and nanophotonics [электронный ресурс] / V.P. Korolkov, R.V. Shimansky, V.N. Khomutov, A.G. Seduhin, R.K. Nasyrov, V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, M.A. Zavyalova // IOP Conf. Series : Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – V. 1368. – P. 022017-1–022017-10. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1368/2/022017/pdf>. – (дата обращения 02.12.2019). ÷ DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022017.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20 тел./факс. (383) 346-08-57

Формат 60×84/16, объем 1.25 п.л., тираж 100 экз.

Заказ № 74, подписано в печать 15 декабря 2020 г.