

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской академии наук

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Юрий Васильевич Чугуй

Новосибирск – 2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ОБЗОР ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ БЕСКОНТАКТНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ СИНТЕЗЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР НА ИХ ПОВЕРХНОСТИ.....	14
1.1 Синтез микро- и наноструктур на 3D поверхностях.....	14
1.2 Основные технические требования к датчикам контроля положения объектов	19
1.3 Методы и системы контроля положения поверхности в системах автоматической фокусировки лазерных технологических комплексов.....	20
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	29
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ НА ОСНОВЕ НОЖА ФУКО ДЛЯ КРУГОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЗАПИСЫВАЮЩИХ СИСТЕМ	31
2.1 Структурная схема круговых лазерных записывающих систем.....	32
2.2 Результаты моделирования и расчета датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко	37
2.3 Экспериментальные исследования погрешности определения положения поверхности объекта датчиком автоматической фокусировки.....	47
2.4 Круговые лазерные записывающие системы с использованием датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко	51
2.5 Экспериментальные результаты по синтезу дифракционных оптических элементов на круговых лазерных записывающих системах с использованием датчика автоматической фокусировки с ножом Фуко	54
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	55
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННОГО КОНФОКАЛЬНОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ХРОМАТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ.....	57

3.1 Конфокальный датчик на основе рефракционно-дифракционных объективов и цветной видеокамеры.....	57
3.1.1 Расчет рефракционно-дифракционных объективов.....	59
3.1.2 Анализатор спектра на основе цветной видеокамеры.....	61
3.2 Экспериментальные исследования конфокального датчика с использованием цветной видеокамеры и рефракционно-дифракционных объективов	63
3.2.1 Исследование погрешностей конфокального датчика	65
3.3 Расчет гиперхроматических объективов для конфокальных датчиков поверхности	69
3.3.1 Повышение разрешения конфокального датчика	76
3.3.2 Экспериментальные исследования конфокального датчика с использованием гиперхроматических объективов и спектрометра	79
3.3.3 Исследование погрешностей конфокального датчика при аподизации гиперхроматического объектива	83
3.4 Ближнеполюсная сканирующая приставка.....	85
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	89
ГЛАВА 4 ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО СИНТЕЗА МИКРО- И НАНОСТРУКТУР НА ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА ШАКА-ГАРТМАНА.....	91
4.1 Микроструктурирование оптически прозрачных сред с помощью лазерной абляции с использованием ультракоротких импульсов пикосекундной длительности.....	91
4.2 Способ контроля качества фокусировки лазерного пучка с помощью анализатора волнового фронта Шака-Гартмана	93

4.3 Экспериментальные исследования прямого контролируемого профилирования оптических прозрачных сред с использованием датчика Шака-Гартмана.....	99
4.3.1 Формирование цилиндрических отверстий в кварцевом стекле лазерным пучком с особой формой распределения интенсивности, сформированных средствами дифракционной оптики	103
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	112
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ «А» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И СПРАВКА ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В НАУЧНЫХ ЦЕНТРАХ ..	127
ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Широкое развитие микро- и нанотехнологий влечет за собой необходимость разработки и исследования методов и средств для прецизионного позиционирования исполнительных элементов (микрообъективов с рабочим отрезком менее 0,8 мм) в ходе лазерного синтеза микро- и наноструктур высокого качества. 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 и контроля микро- и наноструктур высокого качества с глубиной до нескольких микрометров. Такие датчики применяются в лазерных технологических установках для контроля положения обрабатываемых деталей при синтезе высокоточных дифракционных оптических элементов, шкал, лимбов [1], биочипов для целей микрофлюидики [2, 3], а также при исследовании объектов с помощью сканирующих зондов, позволяющих преодолеть дифракционный предел [4, 5].

Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к оптическим бесконтактным датчикам, являются высокое быстродействие (до 1 МГц) и разрешение (погрешность должна быть снижена до 0,1 мкм). К тому же 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 элементов, а также установок для прямого профилирования оптических прозрачных сред методом лазерной абляции необходимо увеличить рабочий

диапазон до нескольких десятков микрометров. Это связано с тем, что любой микрообъектив имеет хроматическую аберрацию и при использовании двух длин волн, например, в видимом и ИК-диапазонах, фокальные плоскости могут быть существенно разнесены.

Альтернативным вариантом решения задачи контроля положения поверхностей и точного 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. В этом случае с помощью методов автоматического контроля положения трехмерных поверхностей можно построить сканирующую систему, позволяющую позиционировать субволновой зонд в области распространения эванесцентной волны [4] с высокой точностью, что дает возможность изучать микро- и наноструктуры в терагерцовом диапазоне.

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 для эффективного управления их глубиной. Несмотря на интенсивное развитие методов лазерной обработки материалов импульсами сверхкороткой длительности [6–8], 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, задача разработки методов автоматического контроля положения трехмерных 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. В настоящее время используется достаточно много различных схем оптических бесконтактных датчиков контроля положения поверхностей [9, 10]. Как правило, тот или иной вариант выбирается под конкретную лазерную технологическую установку с учетом материалов, на которых будет осуществляться лазерный синтез микро- и наноструктур, погрешности позиционирования, рабочего диапазона и скорости записи. 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) и конфокального хроматического датчика, датчика на основе микролинзового раstra для контроля и мониторинга абляции оптических 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 его основе микроскоп записи с улучшенными характеристиками для промышленных образцов круговых лазерных записывающих систем с двумя записывающими лазерами.
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 микро- и наноструктур.

Методы исследований

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

Научная новизна

В работе впервые:

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 ± 60 мкм при наличии достаточно быстрых (до 20–30 Гц) осцилляций поверхности и угле наклона касательной к поверхности до 8° .

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/см² до 31×10^{12} Вт/см² для кварцевого стекла марки КУ-1 (средняя скорость абляции от (23 ± 4) нм до (144 ± 18) нм/импульс) и $0,22 \times 10^{10}$ Вт/см² до $0,34 \times 10^{10}$ Вт/см² для кремния (средняя скорость абляции от $(3,63 \pm 0,63)$ нм до $(7,2 \pm 0,2)$ нм/импульс).

Личный вклад

Автором предложены и рассчитаны оптические схемы 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. Для волоконных конфокальных датчиков рассчитаны гибридные рефракционно-дифракционные и гиперхроматические объективы, позволяющие формировать хроматические отрезки различной длины (100–700 мкм).

Работы по созданию, настройке, исследованию, испытанию и внедрению данных датчиков в составе лазерных установок выполнены коллективом исследователей, инженеров, конструкторов и технологов при непосредственном участии автора. Кроме того, ею проделан большой объем работ по созданию экспериментального стенда и отработке технологии модификации прозрачных стекол импульсами пикосекундного лазера. Она являлась ответственным исполнителем по данной тематике.

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 (приложения 1 и 2).

2. Создана двухканальная круговая лазерная записывающая система для синтеза микроструктурированных компонентов новой элементной базы для оптоэлектронного приборостроения, фотоники и микромеханики, которая находится в эксплуатации в Акционерном обществе «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (Россия, г. Екатеринбург) с 2015 г. (акт внедрения приведен в приложении 3). Конструкторско-технологический институт научного приборостроения (КТИ НП СО РАН) совместно с Институтом автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (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 4. 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) (акт об использовании результатов диссертации приведен в приложении 5).

Связь с государственными научно-техническими программами

Работы по диссертации выполнялись по плану научно-исследовательских работ КТИ НП СО РАН по темам: «Разработка технологий формирования и контроля с наноразрешением непрерывного профиля произвольной топологии на трехмерных широкоапертурных поверхностях» (гос. рег. № 01201364218), «Оптико-информационные, лазерные технологии и системы прецизионного контроля физических и пространственных характеристик 3D макро- и микрообъектов» (гос. рег. № 01201364411), «Разработка технологии высокоточного структурирования поверхности трехмерных оптических материалов лазерным импульсным излучением со сверхкороткой длительностью» (индивидуальный номер в госзадании ФАНО – № 0320-2015-0003, индивидуальный номер в Проектах Комплексной программы фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН – № П.2П/П.10-36), «Фундаментальные основы технологий наноструктур и наноматериалов» (программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 24). Часть работ велась в рамках интеграционного проекта СО РАН № 89 «Разработка метода терагерцовой изображающей спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения с функцией ближнепольного микроскопа» (2009–2011 гг.) и Федеральной целевой программы «Разработка высокоточного 3D лазерного генератора изображений и модернизация лазерной круговой записывающей системы CLWS-300» (ФЦП № 1, контракт № 177-12 от 31.05.2013 г.).

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на следующих международных и отечественных конференциях: Siberian Synchrotron Radiation Center (Novosibirsk, Russia, July 26–29, 2010); 9-я междунар. конф. «Прикладная оптика – 2010» (г. Санкт-Петербург, 18–22 окт. 2010 г.); VII междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2011» (г. Новосибирск, 19–29 апр. 2011 г.); 10-я междунар. конф. «ГолоЭкспо-2013» (г. Москва, 17–18 сент. 2013 г.); VI International symposium

«Modern problems of laser physics – 2013» (Novosibirsk, Aug. 25–31, 2013); X междунар. науч. конгр. и выст. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014»: междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» (г. Новосибирск, 8–18 апр. 2014 г.); молодеж. конкурс-конф.: «Фотоника и оптические технологии» (г. Новосибирск, 14–16 апр. 2014 г.); X междунар. науч. конгр. и выст. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014»: междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» (г. Новосибирск, 8–18 апр. 2014 г.); XX нац. конф. по использованию синхротронного излучения «СИ–2014» (г. Новосибирск, 7–10 июля 2014 г.); 11th IMEKO symposium «Laser metrology for precision measurement and inspection in industry» (Tsukuba, Japan, Sept. 2–5, 2014); 16th Intern. conf. «Laser Optics 2014» (St.-Petersburg, Russia, June30 –July 4, 2014); EOS conf. at the World of Photonics cong. «WPC 2015» (Munich, Germany, Jun. 22–24, 2015); XI междунар. науч. конгр. и выст. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015»: междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» (г. Новосибирск, 13–25 апр. 2015 г.); 17th International Conference «Laser Optics 2016» (St. Petersburg, June 27–July 1, 2016); XIII междунар. науч. конгр. и выст. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017»: междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» (г. Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г.); XIV междунар. науч. конгр. и выст. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018»: междунар. науч. конф. «СибОптика-2018» (г. Новосибирск, 23–27 апр. 2018 г.); XV междунар. науч. конгр. и выст. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2019»: междунар. науч. конф. «СибОптика-2019» (г. Новосибирск, 24–26 апр. 2019 г.); V междунар. конф. и молодеж. школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (г. Самара, 21–24 мая 2019 г.).

Публикации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 28 научных работах, из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК) - 6, а так же 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.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ БЕСКОНТАКТНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ СИНТЕЗЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР НА ИХ ПОВЕРХНОСТИ

Большая часть различных точных измерений в науке и технике осуществляется с помощью оптико-электронных приборов и систем, в которых одни виды сигналов преобразуются в другие [11]. Обычно в измерительных системах в качестве носителя информации используется электромагнитное излучение. Такие параметры, как интенсивность, спектральный состав, состояние поляризации, фаза и др., по отдельности или в комбинации используются для кодирования и декодирования информации. В качестве преобразователей сигналов используются специальные датчики. Они могут быть контактными и бесконтактными и при этом осуществлять электронные операции для реализации необходимой обработки сигналов. В обзорном исследовании и диссертационной работе будут рассмотрены оптико-электронные бесконтактные датчики, в которых выходной сигнал зависит от расстояния до датчика. Особенности таких датчиков являются высокие быстродействие и чувствительность.

1.1 Синтез микро- и наноструктур на 3D поверхностях

Возможность синтеза микро- и наноструктур на плоских и криволинейных поверхностях позволяет производить уникальные оптические элементы и устройства на их основе, которые высоко востребованы в современной технике. К таким элементам относят, например, высокоэффективные гибридные рефракционно-дифракционные оптические системы, у которых на одной или нескольких сферических или асферических поверхностях рефракционных линз сформированы рельефно-фазовые микроструктуры дифракционных линз [12–14]. Они имеют более простую конструкцию за счет уменьшения количества линз, марок стекол и массогабаритных характеристик. Упрощение конструкции оказывается возможным благодаря тому, что большое число эффективных

коррекционных параметров позволяет существенно снизить уровень монохроматических и хроматических aberrаций всех порядков. В работе [15] сообщается, что дифракционные оптические элементы позволяют повысить эффективность ввода лазерного излучения в волокно с 8 до 32 %. Другим примером применения микроструктурированных поверхностей является создание микролинзовых растров, которые являются ключевыми элементами волновых датчиков Шака-Гартмана [16, 17]. С их помощью осуществляется прецизионный мониторинг искривленных поверхностей, aberrаций и оптических неоднородностей. Также технология высокоточного структурирования сферических элементов является неотъемлемой частью исследований, направленных на создание устройств, которые по своим свойствам могут быть максимально приближены к человеческому глазу. Примером таких устройств могут служить полусферические фасеточные камеры [18] и искусственные хрусталики [19].

Прогресс в развитии лазерной техники открывает новые возможности для прецизионной обработки материалов. Механизм действия лазерного излучения в значительной степени зависит от длительности импульса. Так, использование лазеров со сверхкороткими (длительностью 1–100 фемто и 1–100 пикосекунд) импульсами позволяет реализовать новые принципы формирования трехмерных структур на поверхности различных материалов с субмикронным разрешением, поскольку модификация поверхности осуществляется напрямую в пределах сфокусированного лазерного пятна с минимальным тепловым воздействием на материал вне зоны обработки [6, 7]. В случае сравнительно длинных импульсов (длительностью наносекунды и сотни пикосекунд) процесс нагрева сопровождается выбросом капель расплавленного материала. Тепло успевает распространиться из облучаемой области, что приводит к формированию структур с нерезкими краями.

Различают объемную [8] и поверхностную [20] модификации материалов импульсным лазерным излучением. Объемная модификация подразумевает фокусировку лазерного излучения вглубь материала с последующим

необратимым изменением показателя преломления. В случае поверхностной обработки сфокусированное пятно воздействует на границу раздела воздух/материал, где в зависимости от плотности мощности происходит нагрев с последующим плавлением, испарением (абляцией) или формированием поверхностных электромагнитных волн [21]. В работе будет рассмотрена поверхностная модификация кварцевого стекла методом лазерной абляции пикосекундными импульсами. В этом случае имеет место неравновесный процесс нагрева из-за специфического механизма взаимодействия излучения с веществом. Энергия лазерного импульса передается в область фокуса быстрее, чем происходит диффузия тепла в окружающую (необлученную) область. Унос вещества с поверхности происходит после окончания лазерного импульса, поэтому не возникает эффекта экранирования лазерного излучения плазмой факела. Вследствие меньших потерь энергии лазерного излучения абляция материалов начинается при более низких энергиях импульса по сравнению с более длинными импульсами.

Обработанная сверхкороткими импульсами поверхность может иметь более совершенный характер, и возможна высокоточная воспроизводимая обработка материалов без структурных дефектов [21–24]. Очевидно, что разработка технологии микро- и наноструктурирования поверхности кварцевого оптического стекла с помощью лазерной абляции сверхкороткими импульсами может стать альтернативой фотолитографии для создания прецизионных многоуровневых дифракционных и микрооптических элементов [25]. Ожидается, что такая технология будет обладать преимуществами, связанными с исключением из технологического режима многоэтапного процесса создания необходимого профиля, поскольку последний формируется напрямую.

Для определения оптимального режима обработки оптических прозрачных сред необходимо учитывать, что качественные характеристики формируемых структур определяются десятками физико-химических процессов, в большинстве случаев нестационарных, которые, в свою очередь, зависят от большого количества параметров лазерной системы и свойств образца [26]. Особенно это

актуально для оптических материалов – кварца, кварцевого стекла и др., для которых значение термодинамической критической температуры оказывает большое влияние на качество обрабатываемой поверхности [27]. В обзоре [26] сделан вывод о том, что, несмотря на большой опыт, накопленный за время применения лазерных технологий для обработки материалов, математическое моделирование не всегда эффективно и ограничивается получением приблизительного диапазона технологических параметров. Для нахождения оптимальных параметров необходимы экспериментальные исследования и набор статистических данных.

В работах [28, 29] экспериментальным путем показано, что для микрообработки металлов импульсы пикосекундной длительности обладают преимуществом по сравнению с фемто- и наносекундными импульсами. В случае использования фемтосекундных импульсов возникает ряд нелинейных эффектов и это приводит к ухудшению качества обрабатываемой поверхности. При обработке поверхности наносекундными импульсами тепловые эффекты не позволяют сформировать кратеры идеальной формы – всегда присутствуют каемки плавления, сколы и трещины. В работе [30] продемонстрирована впечатляющая разница между обработкой нано- и пикосекундными импульсами на примере тонкопленочного материала.

Авторами работ [31–33] представлен и подробно изучен характер кратеров испарения различных оптических материалов – стекол, кристаллов, природных силикатов (циркон, кварц и др.), фосфатов (монацит, апатит и др.) и сульфидов (галенит, пирит, молибденит, сфалерит, халькопирит и др.) при длительностях импульса от 3–5 нс до 10 нс. Показана возможность образования кратеров с формой, близкой к цилиндрической. Однако в данных работах не приведены данные по средней скорости абляции и зависимости глубин и диаметров кратеров от пороговых плотностей мощности. Для создания технологии микро- и наноструктурирования поверхности оптических прозрачных материалов необходимо определение данных параметров путем облучения поверхности материала одиночным импульсом и изучения результата взаимодействия с

помощью зондовых сканирующих устройств с шагом сканирования несколько нанометров. В литературе таких работ не встречается, в то время как подобные исследования являются основой для создания технологии микро- и наноструктурирования поверхности прозрачных оптических материалов.

В течение последних 15 лет наблюдается впечатляющий прогресс в области создания лазерных технологических комплексов для обработки и структурирования различных типов материалов. Среди них уникальными являются системы, позволяющие проводить микро- и наноструктурирование трехмерных поверхностей с разрешением меньше 0,1 мкм [34]. Известно несколько основных способов структурирования поверхностей: голографический метод [35]; метод плазмохимического травления [36]; алмазное точение [37]; запись сканирующим пучком (электронным [38], лазерным [1], рентгеновскими лучами [39] и ионами легких элементов [40]).

Для реализации многих из этих способов необходим точный контроль положения плоскости фокусировки рабочего микрообъектива, которая должна быть совмещена либо с плоскостью светочувствительного слоя, нанесенного на поверхность подложки, либо с поверхностью подложки. В этом случае задача системы автоматической фокусировки (САФ) заключается в постоянном удержании сфокусированного записывающего пятна на поверхности синтезируемого элемента. САФ перемещает фокусирующий объектив вслед за поверхностью подложки в процессе записи. При этом погрешность фокусировки, превышающая $\pm 0,2$ мкм (объектив с числовой апертурой 0,65), приводит к изменению размеров и формы записывающего пятна и, следовательно, параметров записи, а наклон оси объектива – к появлению погрешности координаты записи [41]. Если поверхность записи трехмерная, то задача существенно усложняется и требует разработки и внедрения ранее не использовавшихся прецизионных методов автофокусировки. Разрабатываемые на этих принципах САФ позволяют контролировать технологические процессы с большой точностью. Как правило, такие системы содержат большое количество оригинальных датчиков, во многом определяющих эффективность

технологического процесса. Поэтому уже сейчас сенсорику выделяют как быстро прогрессирующее, чрезвычайно востребованное высокотехнологичное направление.

1.2 Основные технические требования к датчикам контроля положения объектов

К датчикам контроля положения объектов, используемых в лазерных технологических установках для формирования микро- и наноструктур высокого качества, предъявляются следующие требования:

1. Компактность и встраиваемость в технологический лазерный канал

Как правило, такие датчики необходимо встраивать в существующие оптические каналы технологических установок. Это связано с тем, что для фокусировки лазерного излучения в пятно диаметром 1 мкм и менее используются микрообъективы с большой числовой апертурой – от 0,65 и выше, и, следовательно, с малым рабочим отрезком, что затрудняет встраивание готового датчика непосредственно перед фокусирующим элементом. Зондирующее излучение датчика таким образом должно фокусироваться тем же элементом, что и излучение рабочего лазера.

2. Высокое быстродействие

Так как лазерные технологические установки имеют высокую скорость записи (до 10 м/с), то датчики положения должны выполнять прецизионное позиционирование исполнительных элементов при частоте сигнала от нескольких килогерц до 1 МГц.

3. Высокое разрешение

Для формирования микроструктур высокого качества с глубиной до нескольких десятков микрометров разрешение датчиков должно быть на порядок лучше – 1 мкм и менее.

4. Рабочий диапазон

Эта характеристика датчика связана с глубиной синтезируемых структур, а также определяет возможность структурирования криволинейных поверхностей.

5. Возможность записи на криволинейных поверхностях

Так как в этом случае зондирующее излучение датчиков контроля положения объектов может дополнительно изменять свои параметры из-за кривизны поверхности, то предварительно должна быть проведена оценка влияния кривизны на сигнал с датчика.

6. Расширенный функционал

Наряду с основной задачей таких датчиков в отслеживании линейного перемещения контролируемого объекта и преобразовании изменения его положения в соответствующий выходной сигнал, они должны осуществлять автоматический поиск обрабатываемой поверхности, определять размер сфокусированного пятна, измерять профиль полученных структур и т.д. Все это улучшает технические возможности лазерных технологических установок и позволяет повысить качество синтезируемых структур.

1.3 Методы и системы контроля положения поверхности в системах автоматической фокусировки лазерных технологических комплексов

Оптические методы контроля поверхности, используемые в лазерных технологических комплексах, весьма разнообразны. По принципу действия их можно разделить на контактные и бесконтактные [9]. В обзоре будут рассмотрены бесконтактные прецизионные датчики, отличительной особенностью которых является отсутствие механической связи с объектом, что позволяет создавать сверхточные элементы с высокой скоростью записи (до 10^7 элементов в секунду).

К оптическим бесконтактным датчикам для измерения расстояний с высоким разрешением (менее 1 мкм) относят интерферометрические [42], триангуляционные [43] и конфокальные датчики [44, 45], которые выпускаются серийно и в больших объемах и, в целом, обеспечивают рост индустрии измерительного оборудования. Рассмотрим основные из них.

Принцип работы интерферометрических датчиков (рисунок 1.1) заключается в следующем: пучок лучей от источника с помощью различных устройств, например, интерферометра Майкельсона, пространственно разделяется

на два и более когерентных пучка. Каждый из пучков проходит различные оптические пути и направляется на экран, создавая интерференционную картину, по которой можно установить разность фаз интерферирующих пучков в данной точке [42]. Если одиночный луч разделен вдоль двух траекторий (измеряемой и опорной), то разность фаз будет указывать на изменение длины одной из них. Это дает возможность определять смещения объектов с большой точностью. Приборы на основе данного принципа имеют большой диапазон измерений (до нескольких метров) и низкую погрешность (несколько десятков нанометров). Однако они очень дороги, сложны в эксплуатации и трудно встраиваются в оптические каналы лазерных технологических установок.

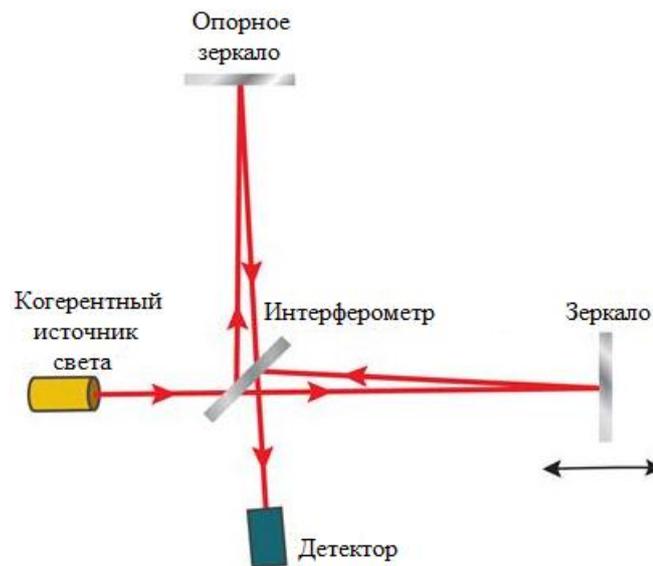


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема интерферометрического датчика

Принцип работы триангуляционного датчика показан на рисунке 1.2.

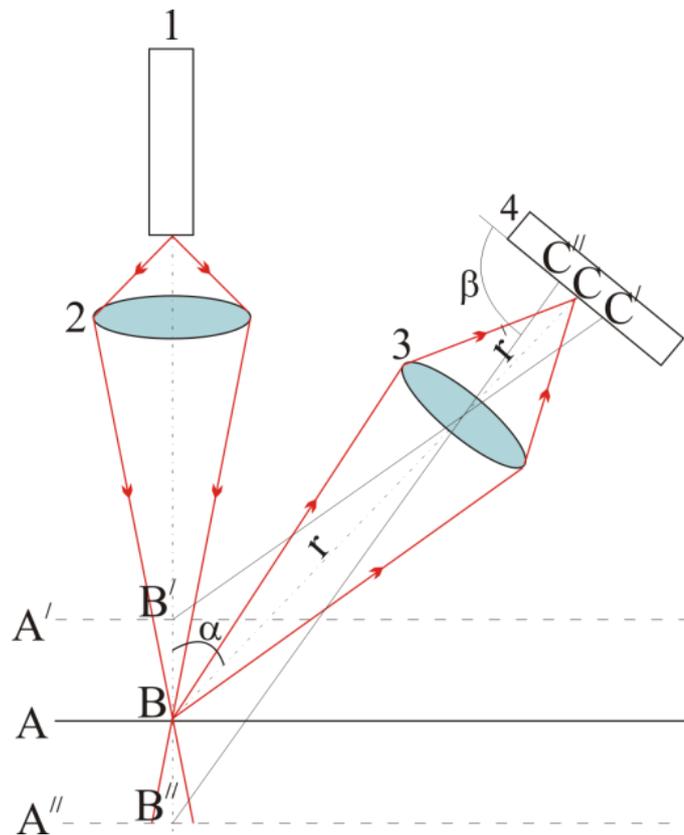


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема триангуляционного датчика

Излучение от лазера **1** (см. рисунок 1.2) направляется линзой **2** на поверхность объекта **A**. Рассеянное излучение фокусируется линзой **3** на фотодиодной линейке **4**. Изменение расстояния до объекта (A' , A'') вызывает соответствующее смещение положения пятна на линейке. Достоинства триангуляционных измерителей: бесконтактность, высокая точность (погрешность 2–10 мкм в диапазоне 1–100 мм), быстроедействие, возможность контроля любых сред и измерения положения объектов в динамике, простота реализации, компактность, невысокая стоимость. Однако датчики такого типа не позволяют измерять расстояния до 3D поверхностей, поскольку кривизна поверхности приводит к отклонению отраженного луча так же, как и ее смещение. Этот недостаток не дает возможность использовать их в лазерных установках, в которых запись информации осуществляется на криволинейных поверхностях.

Еще одним примером оптических прецизионных датчиков являются оптоволоконные устройства внешнего типа [9]. Волокно само по себе не участвует в процессе измерения, а служит линией передачи мощности. Свет,

падающий на торец оптического волокна, способен распространяться по нему лишь в том случае, если угол падения луча по отношению к оси волокна лежит внутри конуса приема. Это означает, что передающее волокно излучает свет внутри такого же конуса. Изменение расстояния приводит к изменению интенсивности принятого света. Достоинством таких датчиков является простота реализации и невысокая стоимость. Однако они позволяют определять расстояния только до хорошо отражающих поверхностей, например, металлов с блеском. Рабочий диапазон измерений составляет несколько сот микрометров при погрешности измерений 0,2–1 %.

Как было сказано выше, вышеперечисленные высокоточные датчики перемещений выпускаются серийно и являются коммерчески доступными на рынке. Но при этом они являются трудно встраиваемыми в лазерные технологические установки для структурирования поверхностей с большим разрешением, так как используемые микрообъективы имеют высокую числовую апертуру (до 0,65) и малый рабочий отрезок (менее 0,7 мм). В связи с этим актуальным представляется задача встраивания датчиков в существующие оптические каналы. Это требует разработки и проектирования датчиков с учетом особенностей технологической установки: её конструкции, скорости записи микро- и наноструктур, обрабатываемого материала, необходимого разрешения и т.д.

Рассмотрим принципы работы ряда датчиков, которые разработаны специально для технологических установок для микро- и наноструктурирования криволинейных поверхностей.

Типичным подходом для компенсации смещения поверхности в процессе записи по трехмерным поверхностям является поворот поверхности подложки таким образом, чтобы сфокусированный луч падал строго перпендикулярно к ее поверхности [46]. Для этого используется видеокамера, на которую переносится изображение сфокусированного пятна на поверхности подложки. Предварительно проводится программная обработка изображения, которое должно быть получено на подложке. Оно делится на субполя, вычисляются проекции каждого из них на

две плоскости вращения, а по ним – углы поворота подложки в зависимости от координат лазерного луча в продольном направлении (рисунок 1.3). Недостатками метода являются высокая сложность механической части, возможность записи изображений на подложках небольшого диаметра – до 20 мм и низкая скорость записи – $10 \text{ см}^2/\text{ч}$.

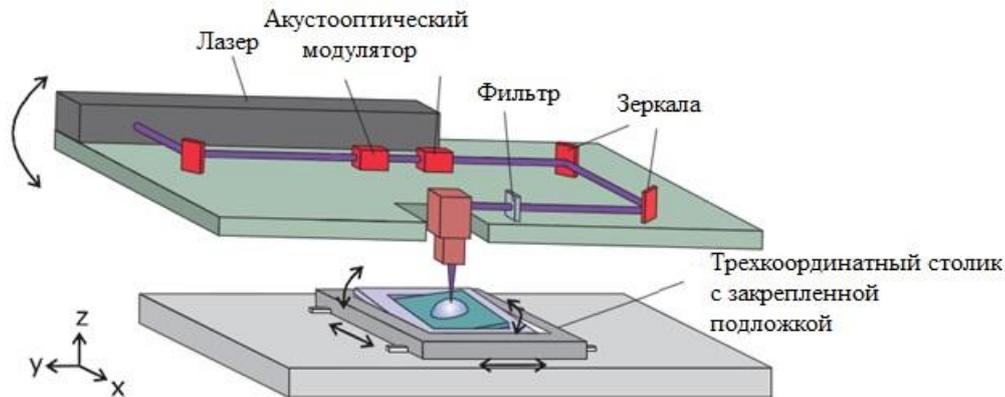


Рисунок 1.3 – Основные функциональные компоненты системы лазерной литографии для структурирования криволинейных поверхностей

В работе [47] описывается установка для лазерной прямой записи на 3D подложке (рисунок 1.4), в которой для контроля расстояния между фокусирующим микрообъективом и подложкой использовались линейные энкодеры фирмы Heidenhain GmbH. Погрешность измерения расстояния составляет $0,1 \text{ мкм}$, ошибка рассогласования – $0,5 \text{ мкм}$. С использованием таких энкодеров были синтезированы концентрические круговые дифракционные решетки с периодом 20, 10 и 5 мкм на вогнутой подложке с радиусом кривизны 196 мм и диаметром 40 мм . Так как в установке используются рабочие объективы с большим рабочим отрезком, то это не позволяет достигнуть высокого разрешения при записи структур (размер пятна составляет несколько микрометров).



Рисунок 1.4 – Схема лазерной прямой записи на 3D подложке

Примером использования конфокального метода определения положения поверхности является литографическая система с так называемым динамическим сканированием [48]. В ней излучение от лазера проходит через разделитель пучка и фокусируется объективом L1 на поверхность заготовки. Отраженный луч направляется микрообъективом L1 и объективом L2 в плоскость конфокальной диафрагмы, за которой вплотную размещен детектор D1 (рисунок 1.5).

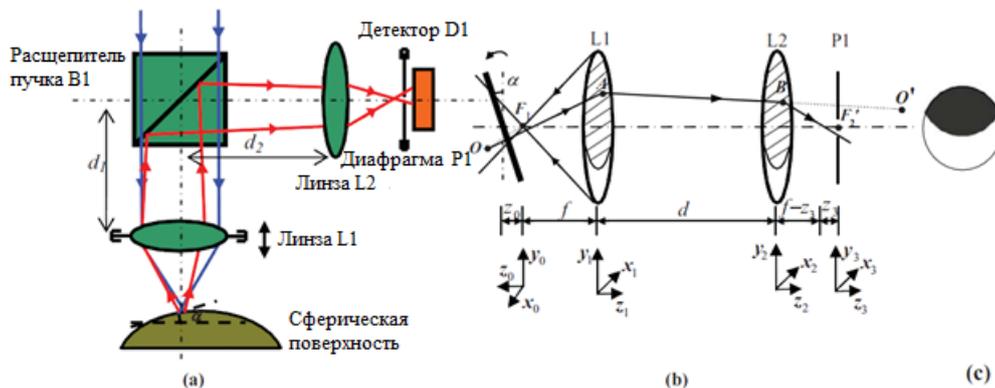


Рисунок 1.5 – Литографическая система с динамическим сканированием:
 а) схема оптической системы, используемой для контроля положения сфокусированного пятна на 3D поверхности; б) ход отраженных лучей в случае наклона и смещения поверхности относительно фокуса микрообъектива L;
 в) изображение пятна в плоскости P1 в направлении оси Z1

В случае наклона поверхности подложки наблюдается смещение пятна на детекторе, а при ее дефокусировке – уменьшение пиковой интенсивности в

центре пятна. По сравнению с традиционными методами этот метод отличается простотой реализации. Достижимый диапазон измерений составляет ± 10 мкм, а ошибка позиционирования – 0,5 мкм при максимальном угле наклона 10° . Однако для контроля положения поверхности подложки в процессе записи необходимо обеспечить непрерывные микросмещения объектива L1 в процессе записи. Поэтому этот метод трудно реализуем в реальных технологических установках, к которым предъявляются жесткие требования по скорости записи.

Авторами работы [49] предложен метод критического угла для измерения и компенсации расстояния между микрообъективом и сферической заготовкой в процессе записи. Для реализации этого метода используется призма (рисунок 1.6), в которой полное внутреннее отражение наблюдается только в том случае, когда отраженный от поверхности заготовки лазерный луч является параллельным. Тогда на двух фотодетекторах может быть измерен максимальный сигнал. В случае, если поверхность смещена относительно фокуса, отраженные лучи попадают на призму под углами больше критического, и часть из них выходит наружу. Это приводит к уменьшению сигнала на детекторах.

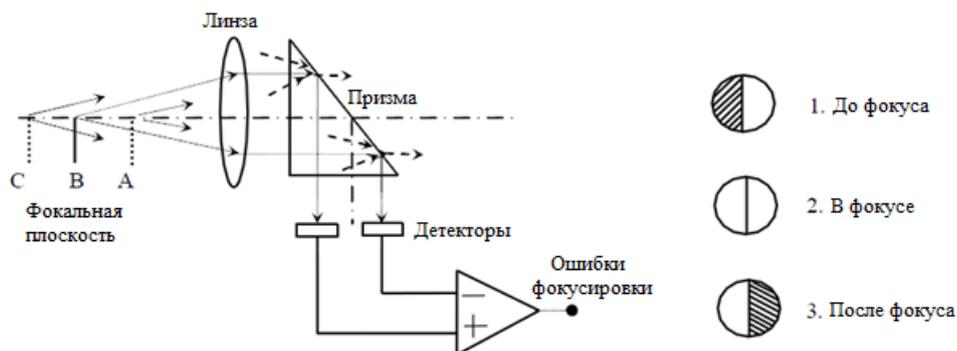


Рисунок 1.6 – Принцип метода критического угла для определения фокальной плоскости рабочего микрообъектива

Хорошую точность дают конфокальные датчики на основе метода хроматического кодирования [44, 45]. Конфокальный принцип в настоящее время широко используется в микроскопии для получения объемных изображений микрообъектов с большим разрешением. Принцип конфокальной методики заключается в следующем (рисунок 1.7). Объектив **2** формирует изображения

точек освещенной прозрачной среды **1** в плоскости **3**, отрезки l и l' оптически сопряжены. В оптически сопряженную плоскость **3** помещают диафрагму малого диаметра (pin-hole). Видно, что в этом случае световой пучок из точки **B**, находящейся в фокальной плоскости объектива **3** (сплошные линии), пройдет беспрепятственно через диафрагму (точка B'). Световые пучки из точек **A** и **C** (пунктирные линии) в основном будут задерживаться диафрагмой. Таким образом, конфокальная диафрагма выполняет роль своего рода «пространственного фильтра», позволяющего снимать информацию только с отдельного сечения внутри прозрачного образца вдоль оси **Z**.

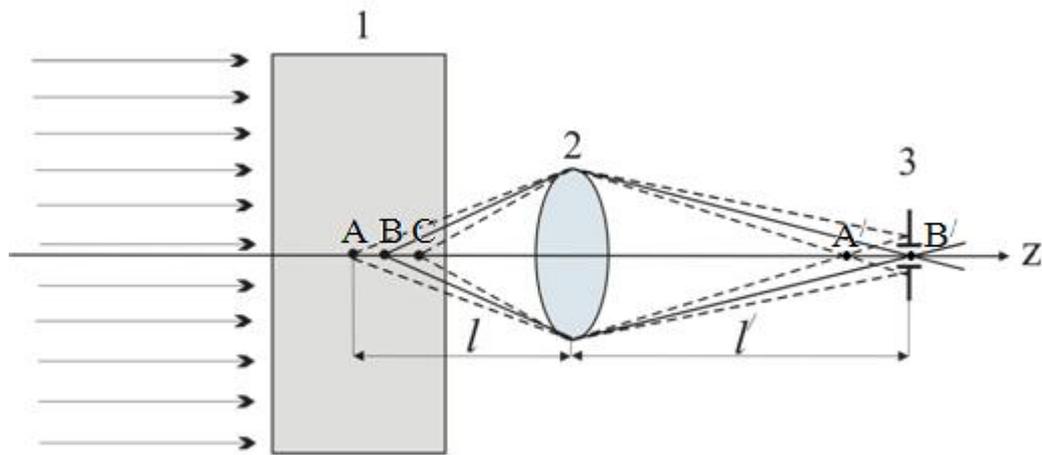


Рисунок 1.7 – Принцип конфокальной методики для определения положения поверхности подложки

Если же в объектив такого микроскопа ввести увеличенную продольную хроматическую aberrацию, а отраженный сигнал, прошедший через конфокальную диафрагму, измерить с помощью спектроанализатора, то можно построить бесконтактный датчик поверхности, базовая схема которого приведена на рисунке 1.8.

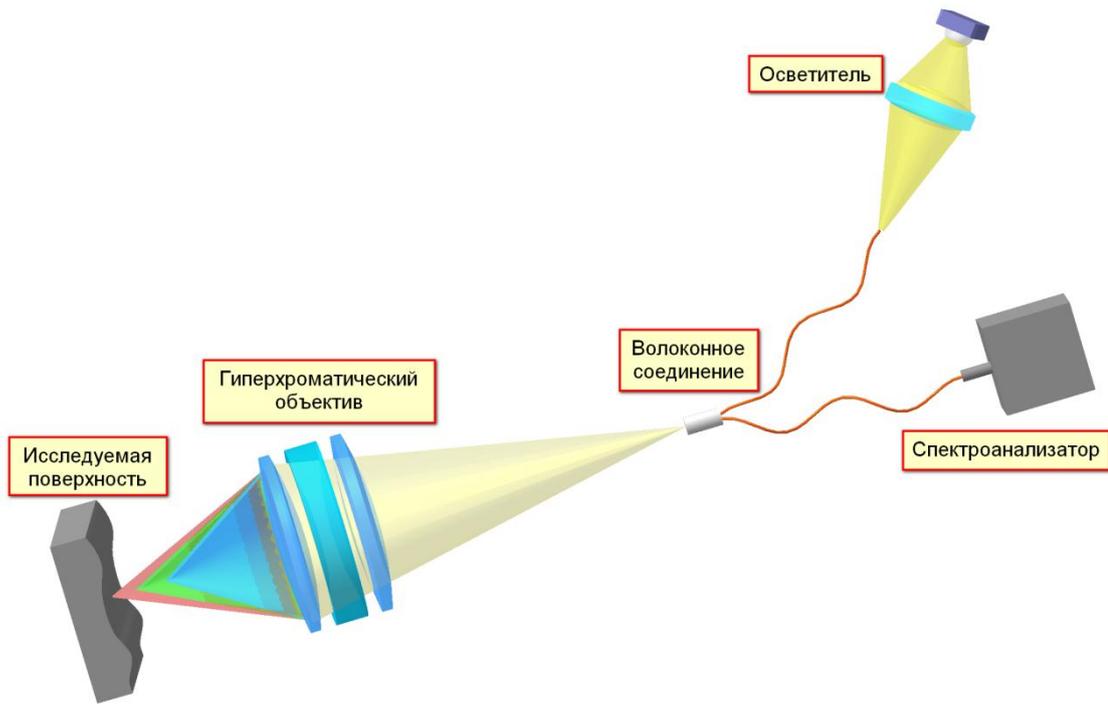


Рисунок 1.8 – Конфокальный датчик на основе метода хроматического кодирования в волоконном исполнении

Чаще всего в конфокальных датчиках используются сваренные вместе многомодовые волокна с целью уменьшения размера измерительной головки и выноса осветительной и приемной части за пределы измерительной области [50–52]. На рисунке 1.8 пучок лучей от источника белого света собирается в оптическое волокно и направляется на гиперхроматический объектив (ГХО), который используется для формирования увеличенной продольной хроматической аберрации. Так как фокусное расстояние ГХО зависит от длины волны, свет трансформируется в линию спектрально разделенных фокусов. При этом только один из фокусов совпадает с плоскостью исследуемой поверхности. Отраженный свет проходит ГХО второй раз и собирается назад в волокно. При этом только свет с длиной волны от фокальной плоскости, совпадающей с поверхностью объекта, фокусируется на торец волокна. Интенсивность света остальных длин волн подвергается дефокусировке и сильному ослаблению при вводе в волокно. Торец волокна, по сути, выполняет роль конфокальной диафрагмы. Далее световой пучок проходит через второе волокно на спектроанализатор, с помощью которого регистрируется спектральное

распределение сигнала. По изменению доминирующей длины волны отраженного сигнала смещение объекта определяется автоматически. В качестве спектроанализаторов в таких датчиках могут использоваться видеокамера, спектрометр [44], а также многоэлементные RGB-диоды [50]. Источником излучения служат галогеновые лампы, сверхъяркие светодиоды, лазеры–суперконтинуумы и др. [53–55].

На основе этого принципа в настоящее время разработаны конфокальные датчики, имеющие ряд преимуществ по сравнению с другими типами датчиков. Во-первых, разрешение конфокальных датчиков достигает 10–100 нм на рабочей дистанции 0,1–20 мм, во-вторых, они имеют высокое быстродействие – скорость измерения достигает 14 кГц, поскольку отсутствует потеря скорости на механических обратных связях, в-третьих, особенности конструкции таких датчиков позволяют использовать их для измерения в труднодоступных местах. Такие датчики позволяют измерять расстояния до блестящих, окрашенных и прозрачных сред, восстанавливать 3D профиль поверхности, а также определять толщину тонких пленок. Разработка таких датчиков является перспективным направлением в отечественном оптическом приборостроении в рамках как импортозамещения, так и создания специализированных устройств для конкретных задач контроля положения объектов и их профилирования.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

В результате анализа рынка коммерчески доступных бесконтактных датчиков для контроля положения поверхности объектов установлено, что, несмотря на их многообразие, они трудно встраиваемы в лазерные технологические установки. Сформулированы требования, предъявляемые к датчикам в таких установках, а именно: высокие быстродействие (до 1 МГц) и разрешение (погрешность не должна превышать 0,1–0,01 мкм), возможность контроля положения сферических (выпуклых или вогнутых) поверхностей, а

также приемлемые массогабаритные характеристики. Важнейшим среди требований является совместимость оптических схем датчиков с оптическими схемами лазерных рабочих каналов. Существующие датчики удовлетворяют лишь часть этих требований. Так, лазерные интерферометрические датчики имеют необходимые чувствительность и быстродействие, но при этом не могут быть совмещены с рабочим микрообъективом, фокусирующим лазерное излучение. Триангуляционные датчики могут измерить расстояние только до плоских поверхностей и имеют погрешность измерения 1 мкм и более. Доступные коммерческие датчики (интерферометрического и конфокального типов) в основном производятся за рубежом и являются дорогостоящими (более \$ 15000). Они имеют оптические схемы «закрытого» типа и не могут быть внедрены в лазерные установки, в которых используются микрообъективы с малым рабочим отрезком (менее 1 мм). Поэтому области и масштабы их применения пока сильно ограничены, и вполне естественно, что усилия разработчиков направлены на создание таких датчиков и уменьшение их себестоимости.

Таким образом, обзор литературы показал, что актуальной задачей при проектировании как лазерных технологических комплексов, так и систем профилирования поверхности является разработка и исследование быстродействующих прецизионных датчиков для автоматической фокусировки лазерного излучения на оптических поверхностях, контроля результата взаимодействия и измерения профиля синтезированных структур.

В связи с вышесказанным, представляется актуальной задача разработки и создания бесконтактных быстродействующих датчиков с повышенной точностью для контроля положения поверхности объектов в ходе высокоскоростных технологических процессов, а также их экспериментальные исследования. Сделан вывод о необходимости проектирования и изготовления собственных гиперхроматических объективов с открытой оптической схемой и управляемыми аберрациями.

В диссертационной работе указанная задача решена на примере нескольких типов датчиков, которые внедрены в круговые лазерные записывающие системы, а также в ближнепольную приставку для терагерцового изображающего спектрографа нарушенного полного внутреннего отражения, разработанного в ИЯФ СО РАН, а также в установку для лазерной абляции оптически прозрачных сред импульсами пикосекундной длительности (КТИ НП СО РАН).

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ НА ОСНОВЕ НОЖА ФУКО ДЛЯ КРУГОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЗАПИСЫВАЮЩИХ СИСТЕМ

Основной функцией системы автоматической фокусировки излучения на рабочих поверхностях является совмещение без участия оценочных действий оператора плоскости наилучшей фокусировки лазерного пучка с поверхностью обрабатываемой детали. Как правило, такие системы используются в технологических установках с короткофокусным объективом и состоят из чувствительного элемента – датчика расстояния и привода, смещающего объектив. Также в их состав входит пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор – устройство с обратной связью, которое формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трех слагаемых: первое из них пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе слагаемое является интегралом сигнала рассогласования, третье – производная сигнала рассогласования. Системы автоматической фокусировки обеспечивают высокоскоростное зондирование поверхности и за счет обратной связи позволяют обеспечивать постоянный зазор между объективом и поверхностью.

В данном разделе представлены: программное моделирование, оптимизация оптической схемы, результаты исследования и внедрения датчика автоматической фокусировки (ДАФ) на основе ножа Фуко, который используется в круговых лазерных записывающих системах (КЛЗС) для синтеза микроструктур на плоских и криволинейных поверхностях оптических материалов.

2.1 Структурная схема круговых лазерных записывающих систем

В течение многих лет в ведущих отечественных и зарубежных оптических центрах успешно функционируют круговые лазерные записывающие системы, разработанные КТИ НП совместно с ИАиЭ СО РАН [1]. Важным элементом КЛЗС, определяющим его характеристики, является датчик автоматической фокусировки на основе ножа Фуко. С использованием такого датчика на КЛЗС синтезируются прецизионные оптические элементы на плоских и криволинейных поверхностях. Рассмотрим структурную схему КЛЗС. Как правило, такие системы имеют в своем составе технологический лазер (один или несколько) и полностью мобильный оптический канал **1** (рисунок 2.1), который целиком размещается на каретке радиального перемещения **2**. Гранитное основание **3** с системой виброзащиты **4** предназначено для размещения оптомеханического блока и снижения влияния вибраций на точностные характеристики его составных частей. В состав КЛЗС нового поколения также может входить второй технологический лазер **5** для реализации сразу нескольких технологий микроструктурирования поверхностей.

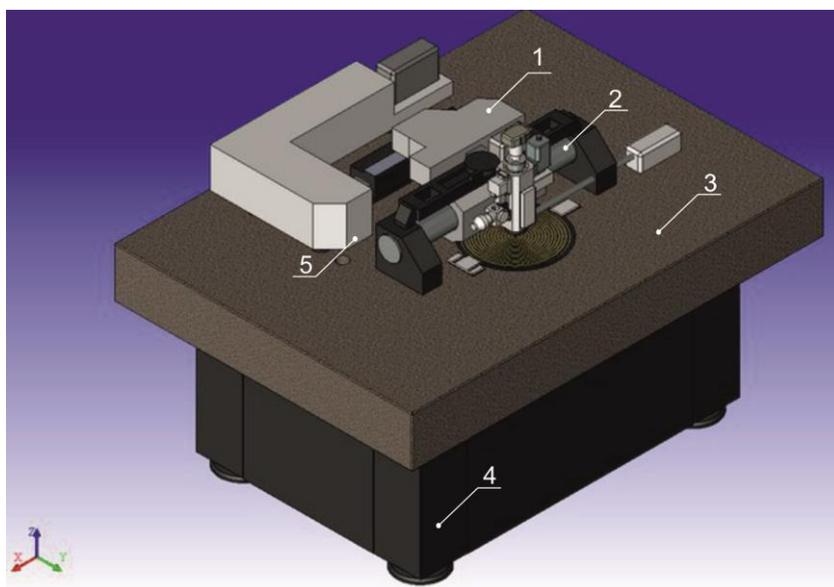


Рисунок 2.1 – Модель круговых лазерных записывающих систем нового поколения: **1** - мобильный оптический канал с технологическим лазером № 1 (длина волны 405 нм); **2** – каретка радиального перемещения; **3** – гранитное основание; **4** – система виброзащиты; **5** – технологический лазер №2 (длина волны 532 нм)

Принцип действия КЛЗС основан на формировании изображения на вращаемой стеклянной подложке с нанесенным на неё фоторезистом или хромом сфокусированным лазерным лучом в режиме кругового растрового сканирования (рисунок 2.2). Подложка размещается на высокопрецизионном шпинделе, который управляется шпиндельным приводом. С помощью микроскопа записи, в состав которого входит датчик автоматической фокусировки и видеоузел, поддерживается фиксированным с высокой точностью расстояние между микрообъективом и поверхностью подложки в вертикальном направлении Z (погрешность не более ± 0.2 мкм). Радиальное смещение R лазерного луча обеспечивается высокоточной кареткой на аэростатическом подшипнике, на которой размещены лазер, акустооптический модулятор и головка микроскопа записи. Смещение R измеряется лазерным интерферометром (модель RLE-10-SX-CX, RENISHAW). Высокая точность синтеза элементов топологии достигается благодаря применению прецизионных систем управления.

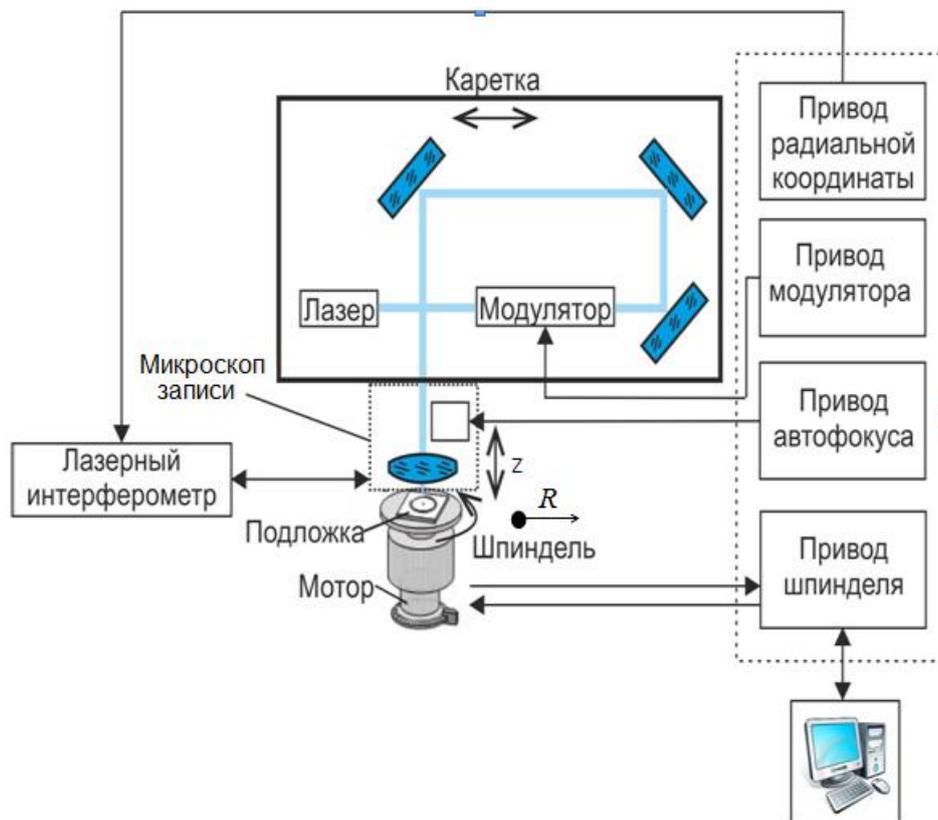


Рисунок 2.2 – Структурная схема круговых лазерных записывающих систем с использованием датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко

В КЛЗС [1] для синтеза микрорельефа дифракционных оптических элементов на криволинейных поверхностях используется датчик автоматической фокусировки (ДАФ), который позволяет производить автоматический поиск поверхности, на которой производится запись изображения, её захват и последующее удержание в зоне наилучшей фокусировки микрообъектива [56].

Рабочий микрообъектив для КЛЗС имеет большую числовую апертуру ($NA = 0,65$). При этом глубина фокуса для длины волны $\lambda = 532$ нм составляет $\pm 0,5$ мкм. Поэтому во время записи скрытых изображений в пленках светочувствительных материалов поверхность должна оставаться в этом диапазоне, чтобы формировались линии одинаковой ширины с одинаковым уровнем засветки рабочим излучением. В составе КЛЗС рабочий микрообъектив закреплен на электромагнитном приводе, который позволяет ему перемещаться вверх/вниз, отработывая постоянное расстояние до поверхности в пределах приемлемого диапазона. Так как шпиндель, на котором закреплена заготовка, вращается со скоростью порядка 10 оборотов в секунду, то привод отработывает смещения поверхности в режиме реального времени. Его частотная характеристика составляет несколько килогерц.

На привод поступает управляющий сигнал, пропорциональный коэффициенту отражения от поверхности заготовки зондирующего лазерного излучения. На рисунке 2.3 приведена принципиальная схема ДАФ, в основу которой положена оптическая схема, описанная в [57].

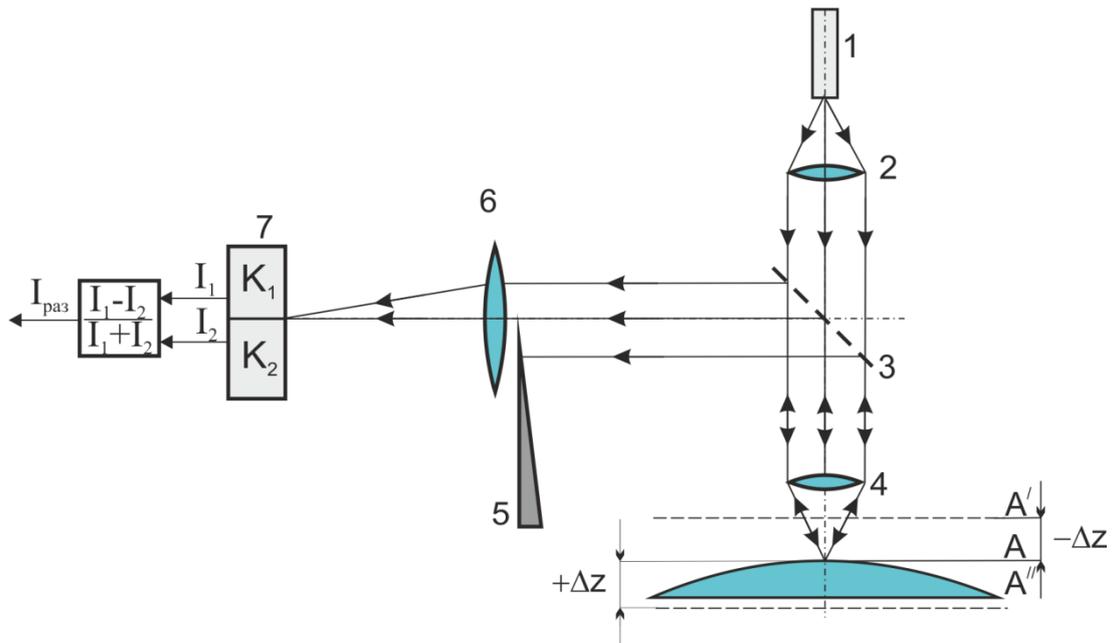


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко для записи на плоских и криволинейных поверхностях

В нее входят полупроводниковый лазер **1** (модель FCM-0640-PM-025-R-M-1-A-5, фирма Fiblaser Technology Co., Китай) с волоконным коллимированным выводом излучения **2** ($\lambda = 640$ нм), светоделительное зеркало **3**, рабочий микробиоъектив **4** с числовой апертурой 0,65, нож Фуко **5** (стальная пластина с заостренным краем), линза **6** ($f = 40$ мм), фокусирующая отраженное от поверхности заготовки излучение на двухэлементный фотоприемник ФД19–КК. В качестве меры измерения расстояния до объекта используется неравномерность распределения интенсивности отраженного света на элементах фотоприемника. Когда поверхность находится в фокусе, отраженный пучок коллимируется и вторая линза фокусирует световой пучок в центр сдвоенного фотодиода, который дает разностный сигнал $I_{\text{раз}} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$ (I_1 и I_2 – сила тока в микроамперах с K_1 и K_2 элементов фотоприемника), равный нулю. Если поверхность сместилась от микробиоъектива, то отраженный пучок будет сходящимся (рисунок 2.4, *a*), освещая только фотодиод K_1 . В этом случае значение $I_{\text{раз}}$ будет положительным, и привод подвинет микробиоъектив к поверхности. В другом случае, если

поверхность сместилась к объективу, отраженный пучок отклоняется таким образом, что будет засвечен фотодиод K_2 (рисунок 2.4, б). Это приводит к отрицательному значению $I_{раз}$. В этом случае привод сместит микрообъектив таким образом, чтобы значение $I_{раз}$ равнялось нулю.

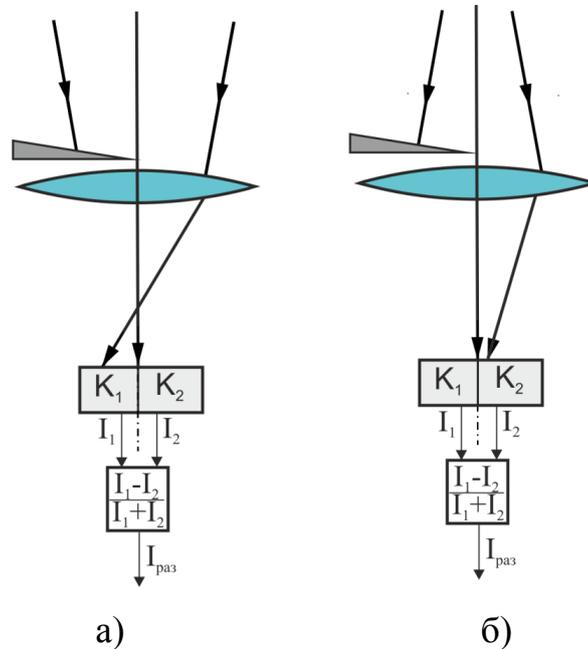


Рисунок 2.4 – Ход лучей в случае смещения рабочей заготовки относительно микрообъектива: а) смещение от микрообъектива (сходящийся пучок); б) смещение к микрообъективу (расходящийся пучок)

В ходе эксплуатации ранних версий КЛЗС, использующих ДАФ подобного типа, была обнаружена их дестабилизация при записи информации на криволинейных поверхностях, а именно: на разных радиусах сферической поверхности сигнал с ДАФ давал ошибочное определение смещения поверхности и требовалась его предварительная калибровка. Кроме того, при автоматическом поиске и захвате поверхности заготовки фокальная плоскость определялась ошибочно и происходило столкновение микрообъектива с заготовкой. Поэтому автором была проведена оптимизация ДАФ с целью обеспечения его бесперебойной работы как в процессе автоматического поиска фокальной плоскости, так и во время записи без предварительной калибровки. Были проведены моделирование и расчет датчика в программном пакете для расчета

ОТФ учитывает дифракционные эффекты, влияющие на формирование изображения. Обработка данных позволила построить аналитическую модель разностного сигнала $I_{раз}$ (рисунок 2.7). Для этого полученное изображение экспортировалось в программный пакет Excel, производилась его обработка: отдельно вычислялось среднее значение яркости в верхней части матрицы данных и отдельно – в нижней. Тем самым моделировалась работа двухэлементного фотоприемника, в котором измеряются два сигнала I_1 и I_2 . По полученным значениям I_1 и I_2 вычислялся результирующий сигнал $I_{раз}$. Обозначим параметр Δz_{af} (см. рисунок 2.7) в качестве рабочего диапазона датчика автофокусировки при смещении контролируемой поверхности в направлении от фокальной плоскости рабочего микрообъектива на величину z , т.е. когда $\Delta z_{af} = f + z$, (где f – фокусное расстояние микрообъектива). Этот параметр требует подробного рассмотрения, так как при больших смещениях поверхности $z > \Delta z_{af}$ возможен сбой в работе датчика автофокусировки. Ошибочное определение смещения поверхности приведет к столкновению микрообъектива с обрабатываемой поверхностью.

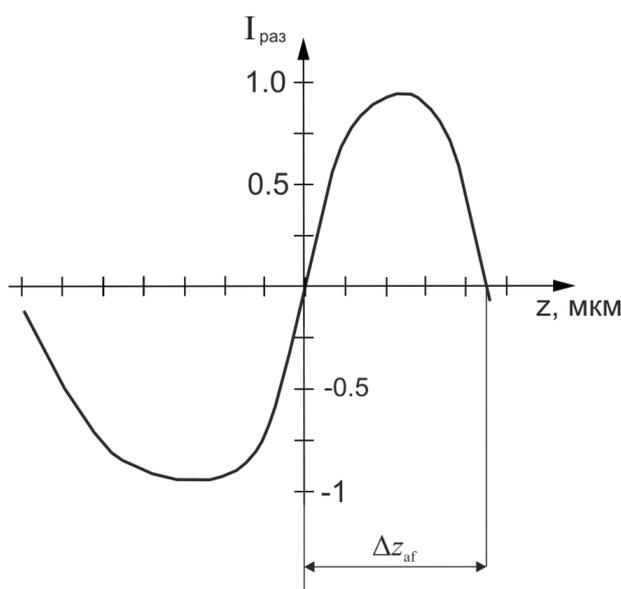
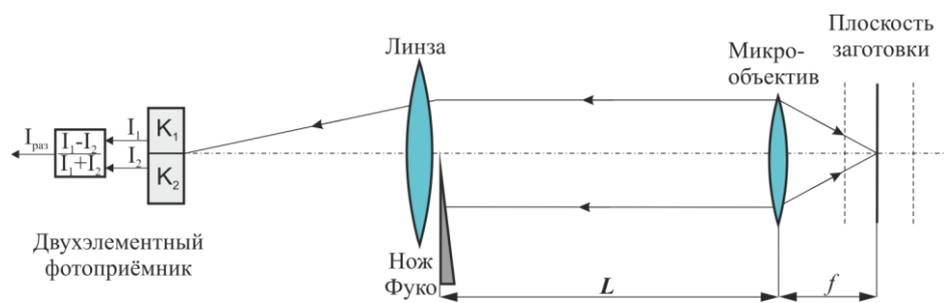
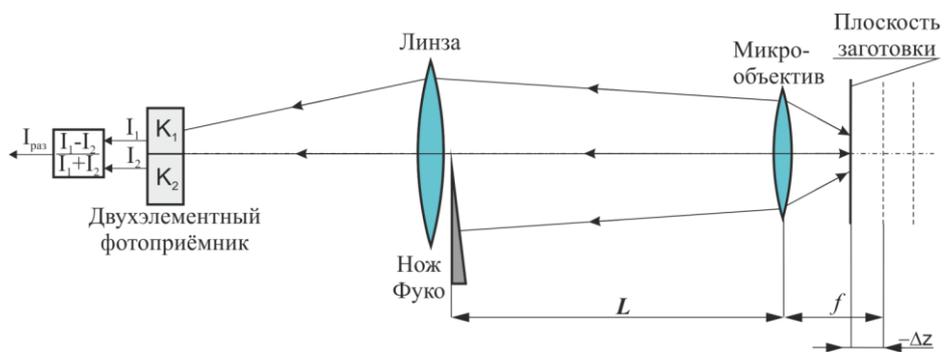


Рисунок 2.7 – Аналитическая зависимость сигнала на двухэлементном фотоприемнике от смещения поверхности

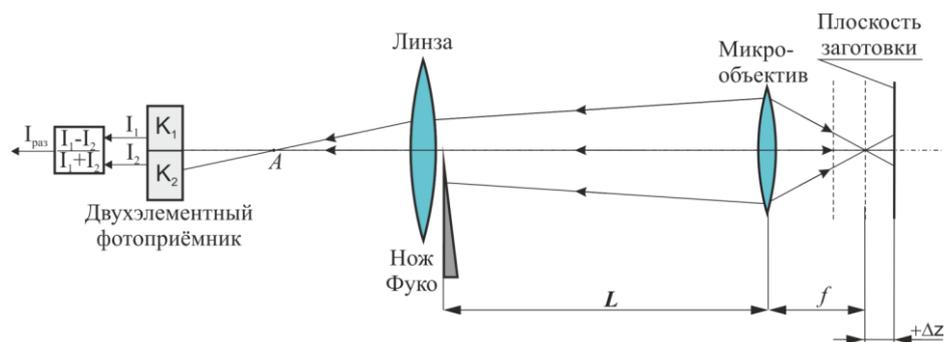
В результате моделирования были выявлено влияние на рабочий диапазон Δz_{af} положения ножа Фуко, а именно расстояния L между ножом и рабочим микрообъективом (см. рисунок 2.8, а). На рисунке 2.8 показан ход лучей в случае смещения поверхности заготовки к рабочему микрообъективу (б) и от него (в). Видно, что в зависимости от расходимости пучка излучение фокусируется либо на верхней, либо на нижней части двухэлементного фотоприемника.



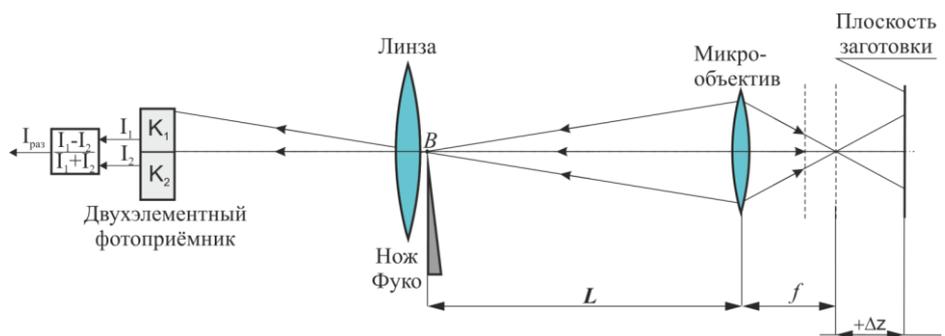
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.8 – Оптическая схема датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко (после микрообъектива показан обратный ход лучей) для случаев: а) смещение плоскости заготовки от микрообъектива; б) смещение плоскости заготовки от микрообъектива при Δz более 200 мкм

Однако при больших смещениях поверхности в направлении от микрообъектива $+\Delta z$ отраженный пучок может сфокусироваться в плоскости ножа Фуко и далее – на верхнем квадранте K_1 (см. рисунок 2.8, z). Это приведет к инверсии сигнала и ошибочному определению направления смещения, поскольку в этом случае $I_1 > I_2$. Поэтому для увеличения рабочего диапазона нож Фуко нужно располагать как можно ближе к микрообъективу, т.е. уменьшать параметр L (см. рисунок 2.8), либо уменьшать расстояние между линзой и микрообъективом. Как показали проведенные расчеты (таблица 1), при уменьшении этого расстояния со 180 мм (такое расстояние изначально было заложено при проектировании КЛЗС) до 50 мм рабочий диапазон увеличивается в 10 раз: с 20 до 200 мкм. Рабочий диапазон оценивался по графику, представленному на рисунке 2.7.

Таблица 1 – Результаты расчета рабочего диапазона ДАФ

Расстояние между микрообъективом и ножом Фуко, мм	Расчетный рабочий диапазон ДАФ Δz_{af} , мкм
180,3	20
150	63
100	96
50	200

Большое влияние на результат измерения оказывает также наклон поверхности, по которой производится запись. Были проанализированы графики зависимости разностного сигнала $I_{раз}$ (см. рисунок 2.9) при смещении поверхностей с разными углами наклона (5, 7, 9 и 10°), полученные в результате программного моделирования оптической схемы датчика в программе Zemax.

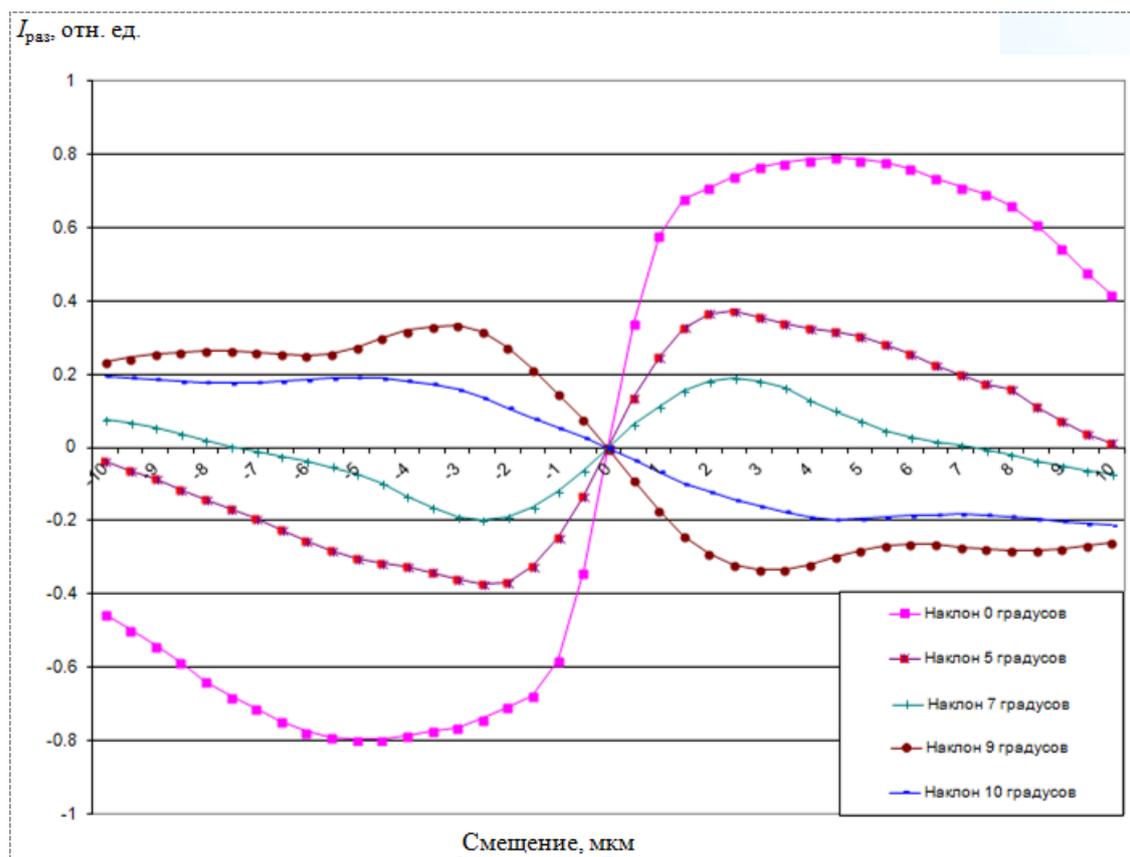


Рисунок 2.9 – График зависимости сигнала с двухэлементного фотоприемника от смещения поверхности при разных углах ее наклона

В результате моделирования выявлен критический угол наклона поверхности для микрообъектива с числовой апертурой 0,65, равный 8° , при котором происходит инверсия разностного графика. Это дает ошибочный сигнал смещения поверхности, при котором датчик автофокусировки срабатывает неверно, и возможно столкновение рабочего микрообъектива и поверхности заготовки. Следует отметить, что при наклоне поверхности уменьшается диапазон измеряемых смещений. Так, при угле наклона 8° он сокращается более чем в два раза. Это связано с тем, что в данном случае нож Фуко перекрывает не половину отраженного пучка, а его меньшую часть, и пучок попадает на обе части фотоприемника. Это приводит к уменьшению разностного сигнала и изменению его знака. Зная предельный угол наклона, исходя из диаметра заготовки можно определить ее максимально допустимый радиус кривизны: $R = D / 2\sin\alpha$, где D – диаметр заготовки, α – угол наклона касательной к сферической поверхности.

Как было показано выше, в двухканальной схеме КЛЗС используется

лазерное излучение с длинами волн 405 и 532 нм. Зондирующее излучение, используемое в ДАФ, имеет длину волны 640 нм. Для стандартных микрообъективов с числовой апертурой 0,65 величина хроматизма положения в диапазоне указанных длин волн достигает несколько микрометров. Соответственно, для точной фокусировки в одной плоскости лазерных пучков с тремя разными длинами волн необходимо менять расходимость излучения каждого из лазеров. При этом расчеты показали, что излучение в ДАФ должно быть строго коллимированным для оптимальной работы на криволинейных поверхностях. Это связано с тем, что в случае зондирования сферической поверхности расфокусированным пучком она влияет на расходимость пучка при отсутствии аксиального смещения заготовки (см. рисунок 2.10).

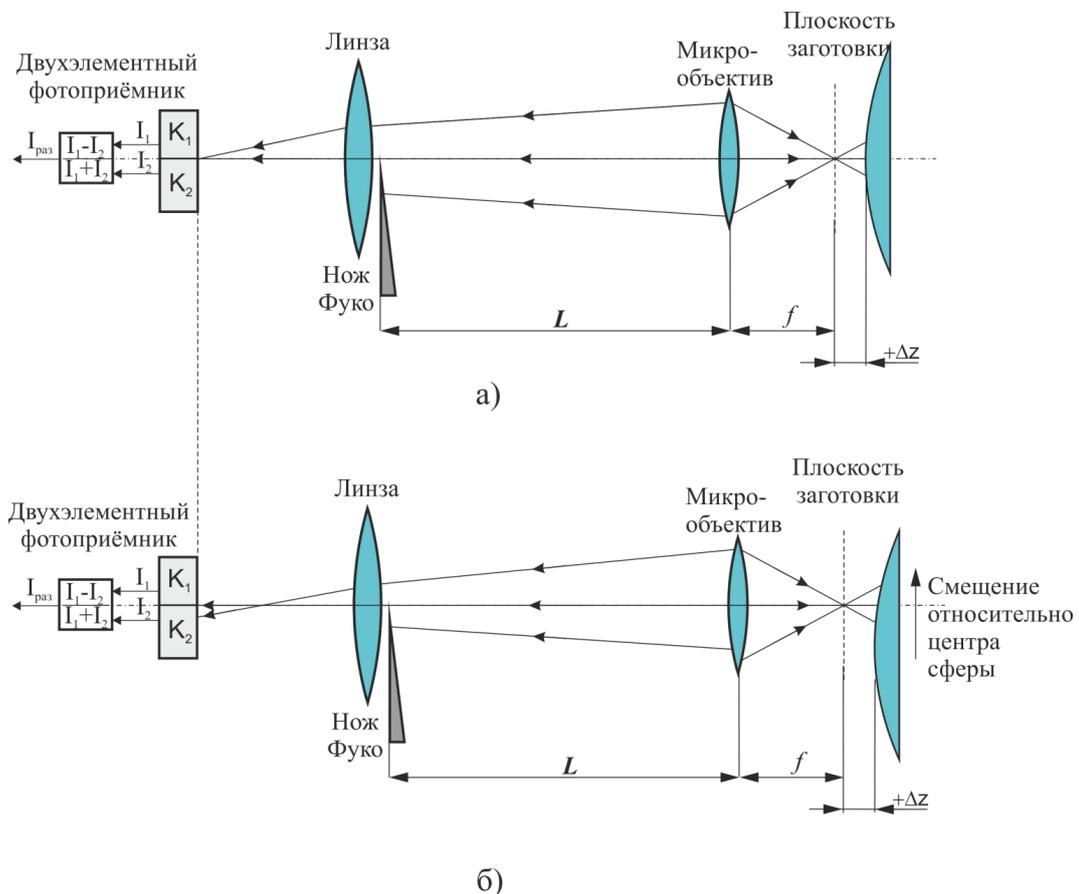


Рисунок 2.10 – Обратный ход лучей в схеме ДАФ с использованием расфокусированного зондирующего излучения: а) при нахождении в центре криволинейной поверхности; б) при смещении относительно центра криволинейной поверхности

Этот вывод подтверждается приведенным на рисунке 2.11 графиком

зависимости ошибки определения смещения заготовки от положения зондирующего пучка относительно центра сферы при разных значениях расфокусировки излучения ДАФ (смещение относительно фокальной плоскости 5, 7 и 10 мкм). Из графиков видно, что с увеличением расфокусировки растёт ошибка определения смещения сферы вдоль оси z при смещении зондирующего излучения относительно её центра в плоскости x, y .

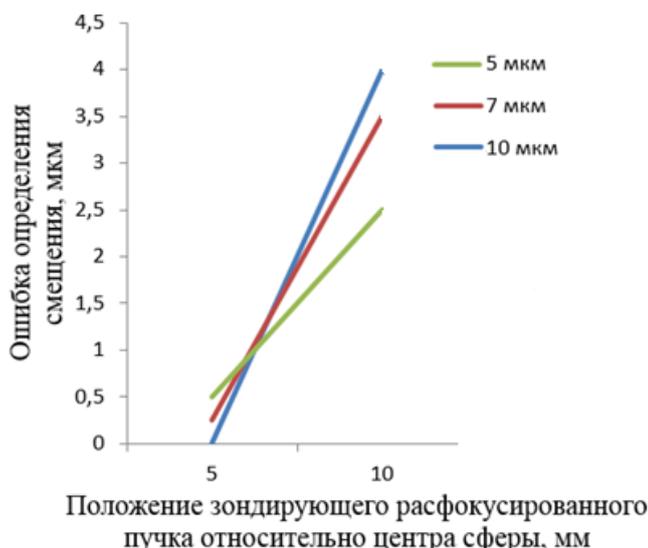


Рисунок 2.11 – Зависимость ошибки определения смещения сферической заготовки (радиус 250 мм) от положения зондирующего пучка относительно центра сферы при разных значениях расфокусировки: 5, 7 и 10 мкм

Результаты, полученные при моделировании ДАФ в программе Zemax, использовались при настройке КЛЗС. Зондирующее излучение ДАФ ($\lambda_r = 658$ нм) коллимировалось, а расходимости волновых фронтов излучений технологических лазеров ($\lambda_b = 405$ нм и $\lambda_g = 532$ нм) изменялись для точного совмещения плоскостей наилучшей фокусировки рабочего микрообъектива.

С помощью программного моделирования было изучено влияние фокусного расстояния микрообъектива на разностный сигнал $I_{\text{раз}}$ ДАФ. На рисунке 2.12 приведен график зависимости $I_{\text{раз}}$ от смещения поверхности для микрообъективов с увеличениями: 20, 40, 60 и 70 крат. Видно, что чувствительность к смещениям (параметр $\gamma = \frac{\Delta I}{\Delta z}$ – отношение изменения сигнала на выходе датчика к смещению поверхности), как и следовало ожидать, возрастает с увеличением апертуры и, следовательно, с уменьшением фокусного расстояния. Особенно это заметно при

переходе от 20-кратного объектива к 40-кратному. В случае применения микрообъективов с увеличениями 60 и 70 крат чувствительность меняется не критично. При этом уменьшается рабочий диапазон смещений поверхности. Так, для микрообъектива 70 крат он составляет всего ± 7 мкм. Поэтому предпочительным по совокупности характеристик является использование микрообъектива с увеличением 40 крат.

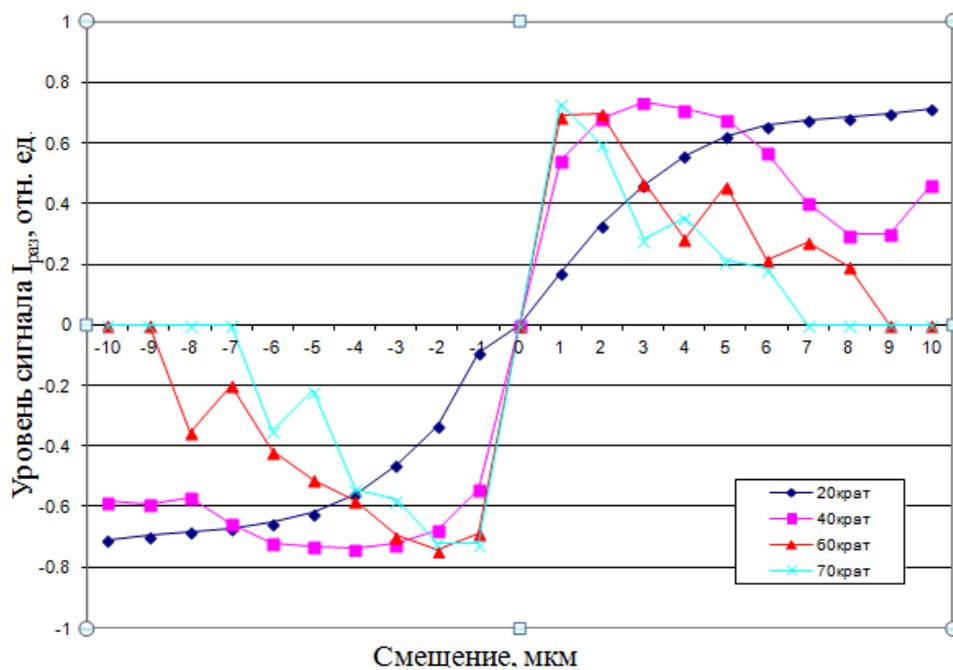


Рисунок 2.12 – График зависимости $I_{раз}$ от смещения поверхности для микрообъективов с увеличениями 20, 40, 60 и 70 крат

На основании результатов, полученных в ходе программного моделирования оптической схемы ДАФ в программе Zemax, был спроектирован микроскоп записи для КЛЗС (рисунок 2.13). Он входит в состав оптического канала записи КЛЗС и предназначен 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 его состав входят оптические элементы из схемы ДАФ, поворотные **1** и дихроичные **3, 4** зеркала, светоделитель **6**, линзы **2, 8, 9**, а также видеокамера для контроля и визуализации записи.

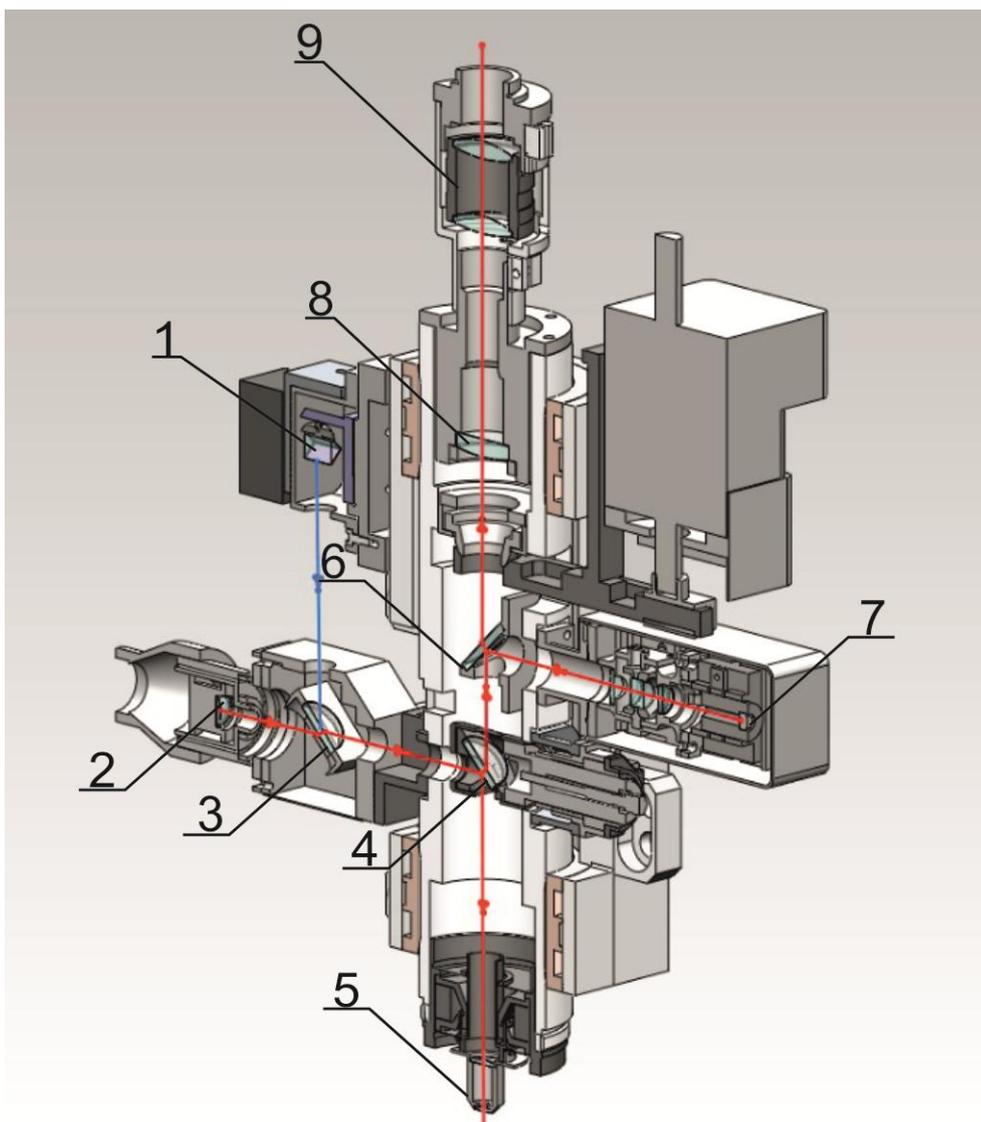


Рисунок 2.13 – Конструкция микроскопа записи для круговой лазерной записывающей системы

Система контроля и визуализации записи предназначена для автоматического считывания результатов записи в режимах поиска центра вращения заготовки и тестирования светочувствительного материала. В качестве подсвечивающего луча используется три пучка лазеров с длинами волн, равными $\lambda = 405, 532$ и 648 нм с уровнем мощности, лежащим ниже порога чувствительности материала записи. В режиме контроля записи отраженный от контролируемой поверхности подсвечивающий пучок света собирается выходным микрообъективом **5**, проходит через дихроичное зеркало **4** и светоделитель **6** и направляется линзами **8** и **9** на видеокамеру (3 Мр, Tucsен).

ДАФ, входящий в состав микроскопа записи, помимо функции автофокусировки излучения, выполняет роль датчика для нахождения фокальной плоскости микрообъектива. Как правило, «на глаз» сложно совместить плоскость заготовки с точкой наилучшей фокусировки микрообъектива. Одним из способов методики настройки является выведение отраженного лазерного излучения на удаленный экран. Для этого на планшайбе вместо заготовки размещается плоское зеркало. Смещением микрообъектива вверх/вниз осуществляется поиск такого положения, при котором диаметр зондирующего излучения сохраняет постоянное значение на больших расстояниях (2–3 мм). Однако такая методика является как трудозатратной, так и субъективной, особенно в условиях, когда используется излучение нескольких длин волн и необходимо найти несколько плоскостей фокусировки излучений, а затем их совместить.

Для реализации дополнительной функции поиска фокальной плоскости микрообъектива **5** в оптическую схему ДАФ вводится пластина с резкими краями. Например, для этой цели могут использоваться микроструктуры в виде двух колец, расположенных близко друг к другу (см. рисунок 2.14). Пластина с микроструктурами размещается вдоль оптической оси микроскопа записи на планшайбе на расстоянии, примерно равном рабочему отрезку микрообъектива. Далее, смещая головку микроскопа записи вдоль осей X и Z , находим такое положение, при котором величина провала на графике зависимости значения отраженного излучения от координаты X будет минимальной. Пример такого графика приведен на рисунке 2.15.

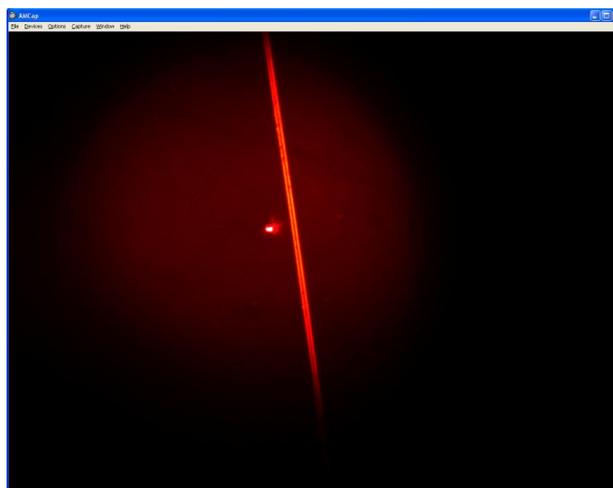


Рисунок 2.14 – Увеличенное изображение микроструктур на микроскопе записи, используемых для сканирования сфокусированного зондирующего и рабочего излучений

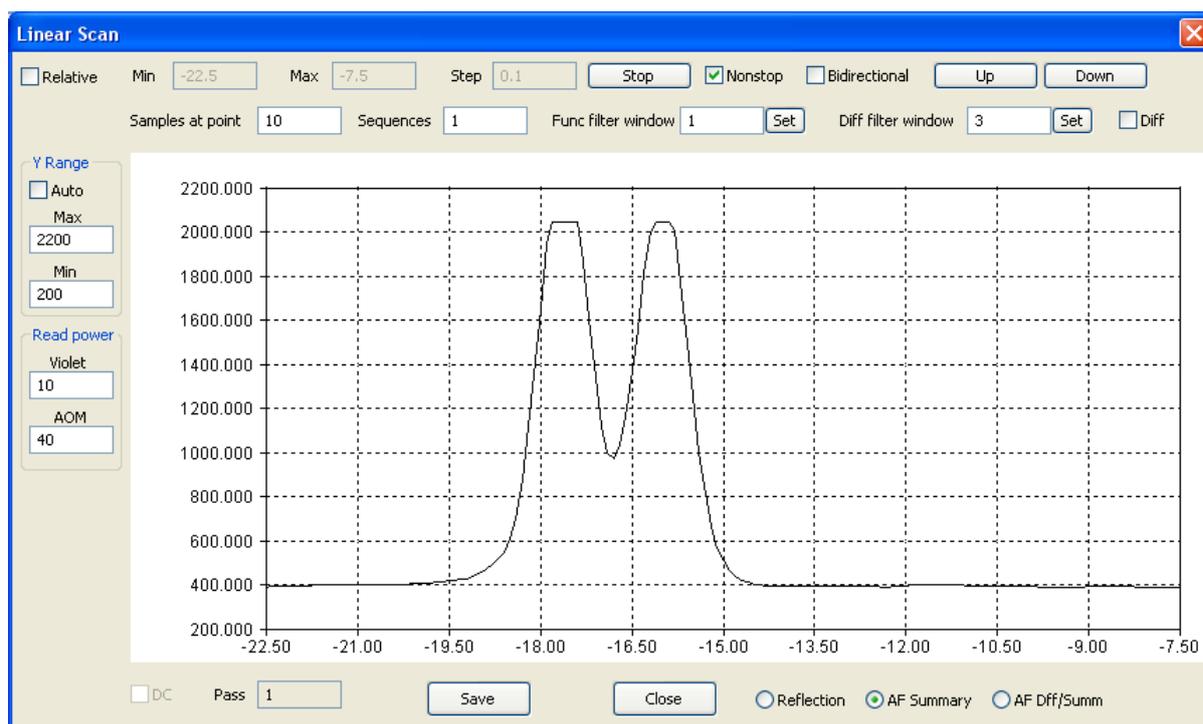


Рисунок 2.15 – Зависимость уровня отраженного излучения от координаты X при положении пластины с резкими краями в фокусе рабочего микрообъектива

Меняя расходимость и осуществляя сканирование сфокусированных пятен, можно добиться такого положения, при котором при одной и той же координате Z для всех пучков график выглядел бы подобным образом (так, как показано на рисунке 2.15). Таким образом осуществляется работа дополнительной функции ДАФ по определению плоскости наилучшей фокусировки излучений датчика и технологических лазеров ($\lambda_r = 658$ нм, $\lambda_b = 405$ нм и $\lambda_g = 532$ нм). После настройки ДАФ оператор осуществляет ее поиск автоматическим путём.

2.3 Экспериментальные исследования погрешности определения положения поверхности объекта датчиком автоматической фокусировки

Оценка погрешности автофокусировки производилась экспериментально тремя способами.

Согласно первому способу погрешность находилась по величине сигнала рассогласования системы автофокусировки (АФ). На рабочем столе шпинделя с помощью вакуумного прижима была закреплена стандартная стеклянная

подложка ППХ 102×102А ТУ11–79. С помощью индикаторной головки на радиусе 45 мм измерялся полный размах биения поверхности подложки за один оборот шпинделя. Подложка юстировалась таким образом, чтобы величина этих биений l была в пределах ± 5 мкм. Затем шпиндель раскручивался до скорости 10 оборотов в секунду. Сначала измерялся размах сигнала рассогласования $\Delta D_{if} = V_1$ с выхода ДАФ при отключенном ПИД-регуляторе. Как видно из рисунка 2.16, величина V_1 составила 2100 усл. ед.

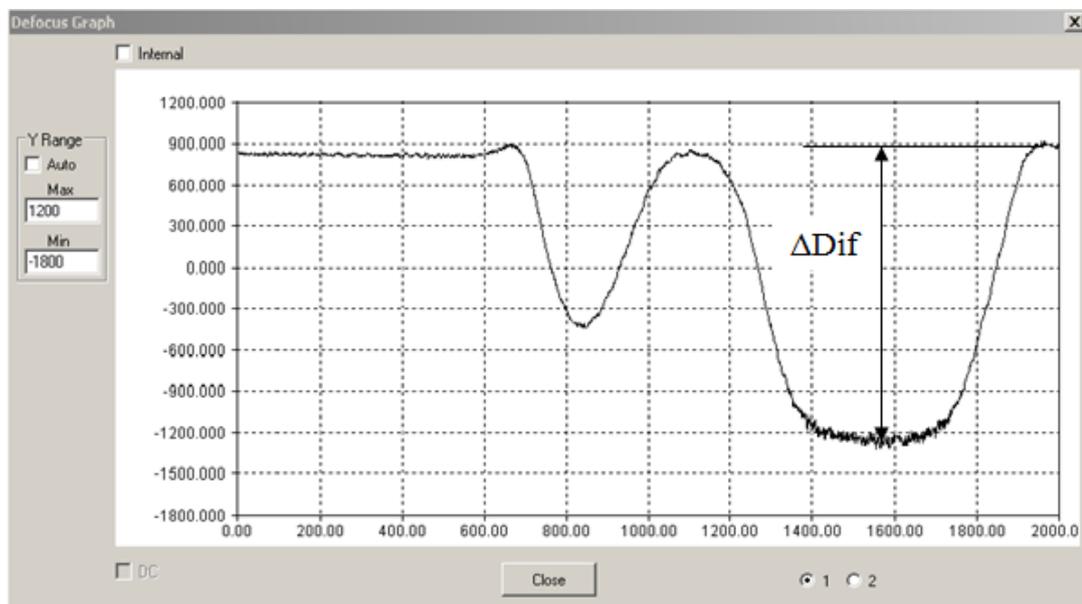


Рисунок 2.16 – Сигнал рассогласования $\Delta D_{if} = V_1$ с выхода ДАФ при отключенном ПИД-регуляторе

Затем включался ПИД-регулятор системы ДАФ и снова измерялся размах сигнала рассогласования $\Delta D_{if} = V_2$. Как видно из рисунка 2.17, его значение не превысило 150 усл. ед.

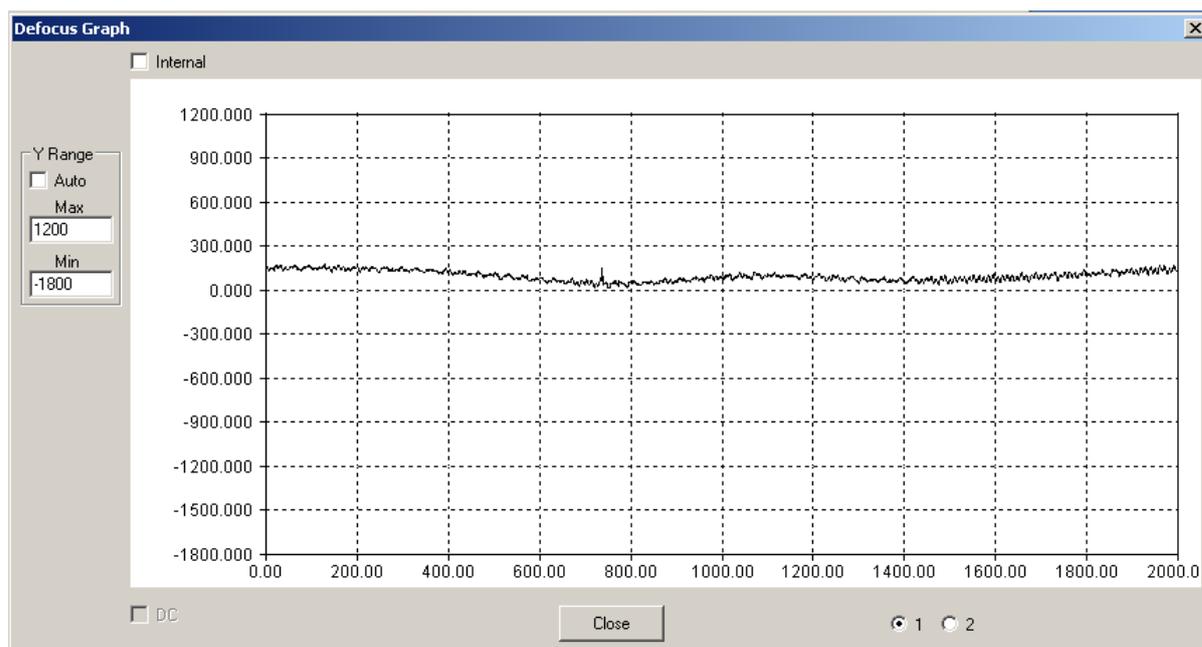


Рисунок 2.17 – Сигнал рассогласования $\Delta Dif = V_2$ с выхода ДАФ при включенном ПИД-регуляторе

Погрешность автофокусировки ΔAF вычислялась как $\Delta AF = lV_2 / V_1$ и составила $\Delta AF = 0,7$ мкм. Отсюда можно сделать вывод, что ДАФ подавляет амплитуду биения подложки в 14 раз. На практике, при записи информации на стандартных подложках для фотолитографии с плоскостностью не более 1–3 мкм, погрешность автофокусировки будет составлять не более 0,1 мкм, что значительно меньше глубины фокусировки записывающего микрообъектива (для микрообъектива с увеличением 40 крат она равна 1 мкм).

Второй способ определения погрешности ДАФ основан на использовании оптического клина. Суть методики заключается в следующем. Зондирующее излучение с ДАФ фокусируется на поверхности оптического клина. При смещении луча вдоль клина на величину Δ имеет место изменение высоты клина Δz , которое эквивалентно смещению относительно фокальной плоскости. При этом значение Δz будет менее 1 мкм. Так, при угле клина $\alpha = 5,7^\circ$ смещение луча $\Delta = 100$ нм приведет к смещению поверхности относительно фокальной плоскости $\Delta z = 10$ нм (см. обозначения на рисунке 2.18).

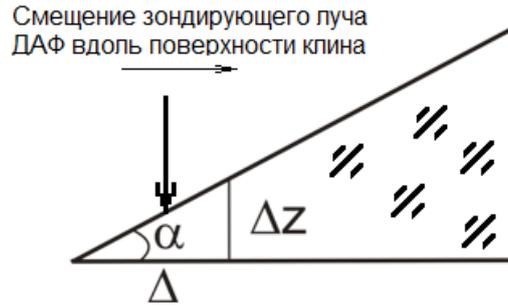


Рисунок 2.18 – Оптический клин для аттестации ДАФ

Согласно обозначениям, представленным на рисунке 2.18, угол клина и параметр Δz связаны следующей формулой: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta z}{\Delta}$, где α – угол клина, Δ – минимальный шаг смещения головки микроскопа записи, Δz – смещение относительно фокуса.

При этом возможна ситуация, когда зондирующий лазерный луч сканирует поверхность клина под некоторым углом, т.е. его движение не параллельно граням клина. Оценим точность, с которой необходимо позиционировать клин относительно зондирующего излучения. Рассмотрим рисунок 2.19.

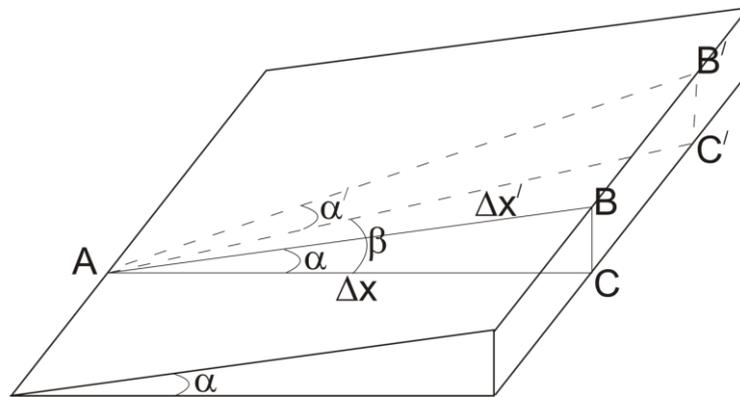


Рисунок 2.19 – К выводу формулы для ошибки позиционирования клина

Здесь AB – это направление, вдоль которого перемещается каретка, а AB' – отклонение направления, составляющее с исходным AB угол β .

Исходя из геометрии, нетрудно показать, что $\beta = \arccos\left(1 - \frac{\Delta}{BC}\right)$. Например, если $\Delta = 10$ нм, то $\beta = 0,57^\circ$. Таким образом, клин нужно позиционировать вдоль зондирующего пучка так, чтобы погрешность позиционирования не превышала $\beta = 0,57^\circ$.

Для аттестации работы ДАФ был изготовлен оптический клин с углом $5,7^\circ$. Были проведены измерения среднеквадратичного отклонения сигнала (СКО) с ПИД-регулятора при смещении микрообъектива вдоль оптического клина. Оно составило $0,2 \times 10^{-4}$ мкА, что соответствует значению СКО 0,08 мкм.

Суть третьего способа заключалась в оценке погрешности ДАФ в совокупности погрешностей всех устройств, осуществляющих контроль перемещения сфокусированного луча и положения заготовки. Была произведена запись дифракционного оптического элемента (ДОЭ), а затем на интерферометре оценивалась ошибка волнового фронта, формируемого им. Результаты будут представлены в пункте 2.5 данной главы, посвященному экспериментальным исследованиям синтеза ДОЭ на плоских и криволинейных плоскостях.

2.4 Круговые лазерные записывающие системы с использованием датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко

Оптимизированный ДАФ вошел в состав КЛЗС, поставленных в 2011–2015 гг. на ряд предприятий страны и за рубежом. Так, по заказу Харбинского института технологий (НИТ, КНР) в 2011 г. совместно КТИ НП СО РАН и ИАиЭ СО РАН при активном участии автора разработан и изготовлен прототип промышленного образца КЛЗС на базе полупроводникового лазера. Отличительной особенностью данной системы является полностью мобильный оптический канал, размещенный на каретке радиального перемещения (рисунок 2.20). В его состав входят записывающий диодный ультрафиолетовый лазер (PhoxX–405–120 фирмы Omicron GmBH, Германия), имеющий мощность 120 мВт и длину волны 405 нм, и дополнительный лазер (FGPM–G–50 фирмы Photop Technologies Inc., Китай) с длиной волны 532 нм и выходной мощностью 50 мВт.

В результате испытаний КЛЗС были получены следующие технические характеристики: диаметр рабочего поля составляет 250 мм, пространственное разрешение – до 1000 линий/мм, разрешение по радиальной координате – 1 нм, разрешение по угловой координате – до $0,25''$, максимальное смещение по вертикальной координате – до 25 мм, погрешность автоматической фокусировки

не превышает 0,2 мкм. При этом максимальный наклон криволинейной поверхности может достигать 8°.

КЛЗС нового поколения благодаря специальной конструкции и предложенным техническим решениям имеет уменьшенный температурный дрейф, более компактен и в целом отличается улучшенными эксплуатационными характеристиками. Он позволяет синтезировать широкий класс оптических элементов с бинарным и непрерывным профилем, включая дифракционные элементы, компьютерно-синтезированные голограммы, решетки, лимбы, различные фотомаски произвольной топологии на плоских и аксиально симметричных вогнутых и выпуклых поверхностях.



Рисунок 2.20 – Внешний вид круговой записывающей системы для Харбинского института технологий (КНР), 2011 г.

Также отличительной особенностью КЛЗС нового поколения, созданной для Харбинского технологического института, является возможность производить запись по осесимметричным вогнутым или выгнутым оптическим заготовкам [58]. Для этого используется ДАФ на основе красного лазера ($\lambda = 658$ нм). С помощью ДАФ осуществляется совмещение плоскостей фокусировки всех типов лазеров, используемых в КЛЗС. При этом коллиматоры для лазерных пучков с

длинами волн 405 и 532 нм юстировались так, чтобы получить сходящиеся пучки, имеющие диаметр 5–5,5 мм на входной апертуре микрообъектива и обеспечивающие совмещение плоскостей фокусировки микрообъектива в плоскости для лазера с длиной волны 658 нм.

В последующие годы были разработаны двухканальные КЛЗС для Самарского государственного аэрокосмического университета (Россия, г. Самара, 2014 г.), АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (Россия, г. Екатеринбург, 2015 г.), АО «Новосибирский приборостроительный завод», Россия, г. Новосибирск, 2015 г.). На рисунке 2.21 приведен один из вариантов КЛЗС, поставленный на АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (Россия, г. Екатеринбург, 2015 г.).



Рисунок 2.21 – Круговая лазерная записывающая система с двумя оптическими каналами для АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (Россия, г. Екатеринбург, 2015 г.)

2.5 Экспериментальные результаты по синтезу дифракционных оптических элементов на круговых лазерных записывающих системах с использованием датчика автоматической фокусировки с ножом Фуко

Стабильность работы датчика автофокусировки вкупе со всеми устройствами, осуществляющими контроль перемещения сфокусированного луча и положения заготовки (угловой датчик: модель RON886, фирма-производитель Heidenhain; лазерный энкодер: модель RLE10-SX-XD, фирма-производитель Renishaw), проверялась в ходе экспериментальных исследований разработанных КЛЗС. Для этого были синтезированы дифракционные структуры на поверхности стеклянных подложек методом прямой лазерной записи профиля в фоторезисте с последующим переносом профиля в стекло с помощью ионно-плазменного травления [58]. На рисунке 2.22 приведена карта, иллюстрирующая качество волнового фронта при изготовлении бинарных дифракционных линз с помощью КЛЗС на основе полупроводникового лазера. Ошибка волнового фронта (RMS) составила $\lambda/100$, что свидетельствует о высоких технических характеристиках КЛЗС.

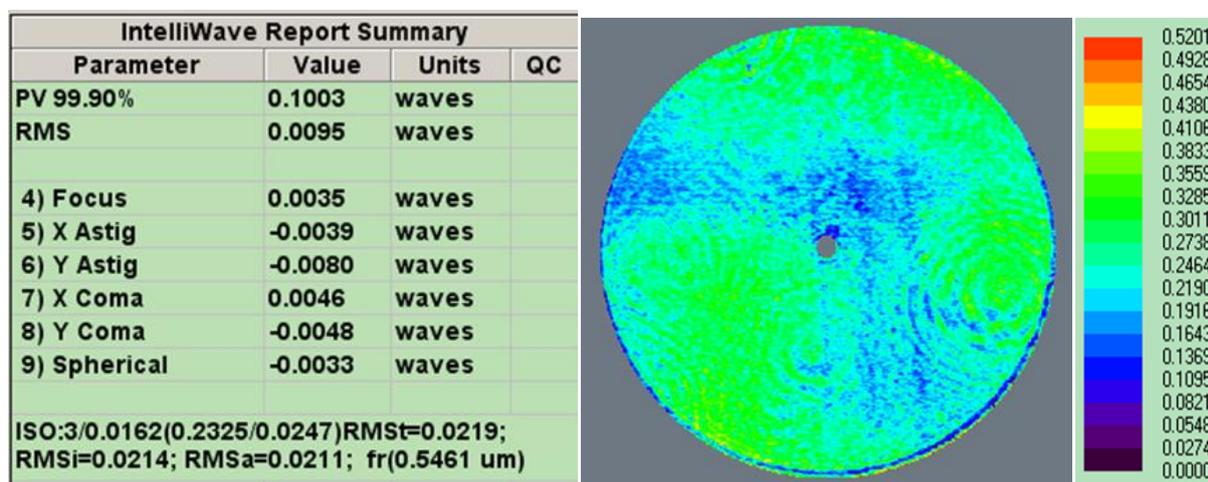


Рисунок 2.22 – Карта искажений волнового фронта при изготовлении бинарных дифракционных линз. Ошибка волнового фронта (RMS) не превышает $\lambda/100$

На рисунке 2.23 представлены интерферограммы бинарной линзы (а) (размеры первой, второй и третьей зон равны соответственно 0,2, 0,5 и 0,7 мм) и линейной дифракционной решетки, записанной на сферической поверхности с

радиусом кривизны 250 мм (б). Интерферограммы демонстрируют возможность записи микроструктур на трехмерных поверхностях. Равномерность рисунка свидетельствует о стабильной работе ДАФ.

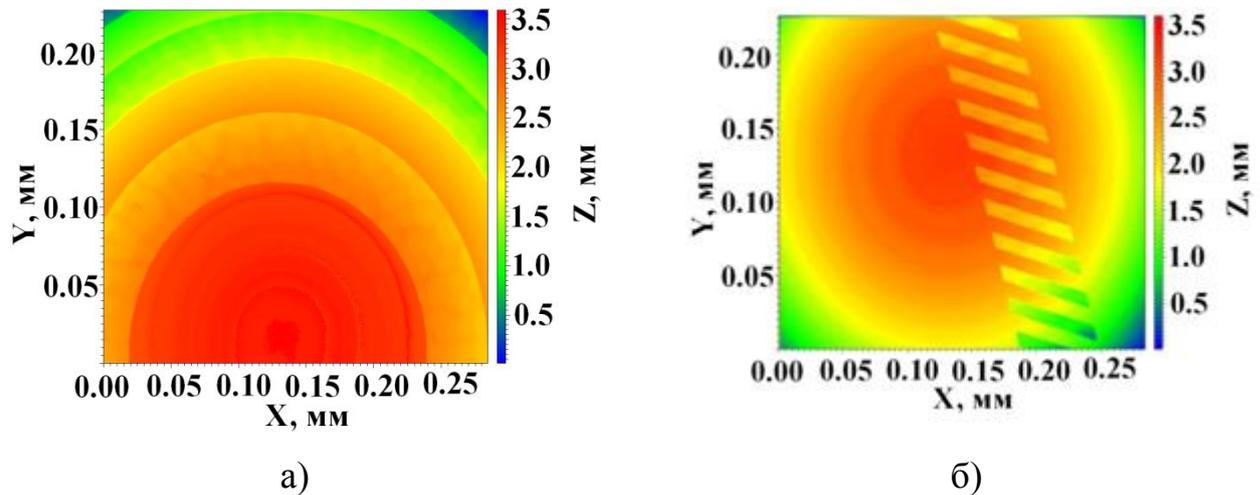


Рисунок 2.23 – Интерферограммы бинарной линзы (а) и линейной дифракционной решетки (б)

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Проведен анализ оптической схемы датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко с использованием программы для проектирования оптических систем Zemax. Установлено, что инверсия разностного сигнала на фотоприемнике и ошибочное определение смещения возникает из-за фокусировки излучения в плоскости ножа Фуко. Показано, что путем изменения расстояния между ножом Фуко и рабочим микрообъективом можно увеличивать или уменьшать рабочий диапазон датчика.

Выявлено, что при угле наклона поверхности более 8° происходит инверсия разностного сигнала датчика автоматической фокусировки и уменьшение рабочего расстояния более чем в два раза. Это накладывает ограничения на радиус кривизны оптической поверхности, на которой происходит запись микро- и наноструктур.

Показано, что в двухканальной схеме лазерного фотопостроителя для компенсации продольной хроматической aberrации микрообъектива необходимо менять расходимость рабочих излучений с длинами волн 405 и 532 нм для фокусировки пятен в плоскости наилучшей фокусировки зондирующего излучения датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко ($\lambda = 658$ нм).

На основании компьютерного моделирования датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко был спроектирован и изготовлен микроскоп записи для круговых лазерных записывающих систем. Предложенные автором технические решения были использованы при разработке коммерческих моделей круговых лазерных записывающих систем.

Проведены испытания разработанного датчика в составе круговой лазерной записывающей системы, в результате которых установлена погрешность определения положения поверхности, равная 0,1–0,2 мкм. Погрешность данного датчика оценивалась в совокупности с погрешностями датчиков, входящих в состав лазерных круговых записывающих систем. Для этого были синтезированы бинарные дифракционные линзы и измерена ошибка волнового фронта, которая не превысила значение $\lambda/100$.

В результате испытаний круговых лазерных записывающих систем, в состав которых вошел разработанный датчик автоматической фокусировки на основе ножа Фуко, были получены следующие технические характеристики: диаметр рабочего поля составляет 285 мм, пространственное разрешение – до 1000 линий/мм, разрешение по радиальной координате – не хуже 1 нм, разрешение по угловой координате – до 0,25", максимальное смещение по вертикальной координате – до 25 мм, ошибка автоматической фокусировки не превышает 0,2 мкм. При этом максимальный наклон криволинейной поверхности достигает 8°.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННОГО КОНФОКАЛЬНОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ХРОМАТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ

Глава посвящена разработке волоконных конфокальных датчиков поверхности на основе метода хроматического кодирования (далее – конфокального датчика). Особое внимание уделено исследованию подходов к проектированию рефракционно-дифракционных и гиперхроматических объективов, позволяющих фокусировать белый свет в хроматические отрезки различной длины. Использование таких объективов в конфокальных датчиках позволяет определять положение объектов с высоким разрешением – менее 1 мкм.

3.1 Конфокальный датчик на основе рефракционно-дифракционных объективов и цветной видеокамеры

В обзорном исследовании было установлено, что волоконные конфокальные датчики на основе метода хроматического кодирования обладают большим потенциалом по таким характеристикам, как разрешающая способность, рабочий диапазон и быстродействие. Однако встраивание коммерчески доступных моделей в лазерные каналы разрабатываемых нами технологических комплексов является затруднительным. Самым главным ограничением является наличие в таких датчиках собственного встроенного микрообъектива, который невозможно внедрить в лазерный канал. В первую очередь это связано с тем, что в используемых нами микрообъективах рабочий отрезок не превышает 0,7 мм. Это означает, что излучения от лазера и от датчика должны проходить по одному и тому же оптическому пути. Вторым ограничением является отсутствие информации о том, как работают коммерческие датчики. В статьях по данной тематике [45, 50–55, 59, 60] обсуждаются в основном принципы работы отдельных компонентов, а не датчика в целом. Именно поэтому целью нашей работы является разработка и создание специализированных конфокальных датчиков для конкретных задач контроля положения объектов при разработке

лазерных технологических установок, а также с целью импортозамещения в условиях действия многочисленных санкций.

Разработка конфокальных датчиков на основе хроматического кодирования позволит расширить рабочий диапазон датчика автоматической фокусировки для круговых лазерных записывающих систем. При этом он позволит проводить микропрофилирование полученных структур сразу после записи без съема образца. Это особенно актуально для установок, в которых синтез ДОЭ осуществляется напрямую с помощью мощного лазерного импульсного излучения.

Рассмотрим принцип работы макета оптического конфокального датчика поверхности, разработанного в КТИ НП СО РАН при активном участии автора (рисунок 3.1). Излучение светодиода фокусируется объективом **1** на торец многомодового волокна, а объектив **2** расширяет и коллимирует пучок, который проходит через светоделительное зеркало, а затем с помощью рефракционно-дифракционного объектива (РД-объектива) **3** расщепляется на хроматические составляющие в измерительном диапазоне Δz , который определим как хроматический отрезок. В зависимости от расстояния до объекта на его поверхности фокусируется свет с определенной длиной волны λ_3 из всего спектрального диапазона $[\lambda_1 \dots \lambda_3]$. Все другие спектральные компоненты дефокусированы. Отраженный свет проходит РД-объектив и с помощью светоделительного зеркала направляется в плоскость конфокальной диафрагмы, которая позволяет выделить практически монохроматический свет, все остальные спектральные компоненты из диапазона Δz отсекаются. Длина волны λ_3 является хроматическим кодом расстояния до объекта – по ее изменению судят о величине смещения.

В качестве спектроанализатора используется цветная видеокамера, позволяющая определить по компонентам R, G, B доминирующую длину волны.

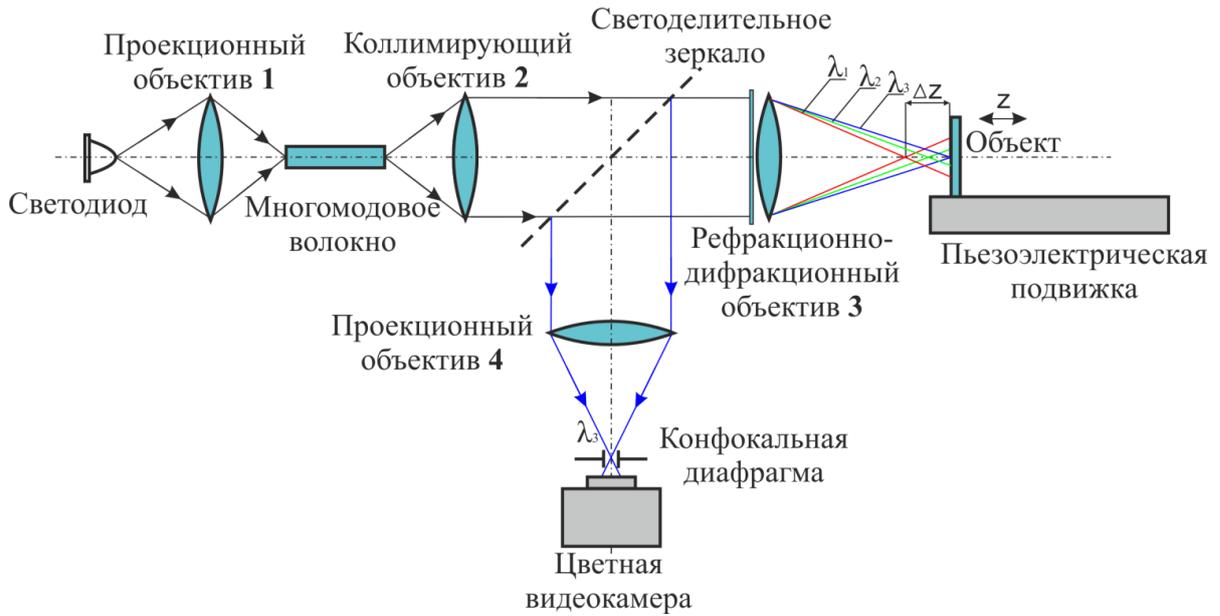


Рисунок 3.1 – Схема оптического конфокального датчика поверхности с хроматическим кодированием на основе цветной видеокамеры

3.1.1 Расчет рефракционно-дифракционных объективов

Основным элементом разработанного нами конфокального датчика является РД-объектив, который состоит из стандартного микрообъектива ($40\times$, $f = 4,3$ мм) и дифракционного оптического элемента (ДОЭ). ДОЭ представляет собой фазовую пластинку с осесимметричной дифракционной структурой [61]. Падающие на ДОЭ световые волны дифрагируют, а затем фокусируются микрообъективом (отсюда название объектива – дифракционно-рефракционный). Данный подход к проектированию обладает рядом преимуществ. Во-первых, микрообъектив исправлен на aberrации и обеспечивает фокусировку излучения в пятно дифракционного качества. Во-вторых, использование ДОЭ позволяет ввести хроматическую aberrацию без необходимости подбора специальных стекол. Сама дифракционная структура ДОЭ обеспечивает разложение света на хроматические составляющие. В совокупности такой подход позволяет получить хроматический отрезок Δz , в котором свет определенной длины волны фокусируется в пятно дифракционного качества без aberrационных искажений [62].

РД-объектив был рассчитан в программном пакете Zemax. Метод расчета основан на алгоритмах оптимизации параметров оптической системы. В нашем

случае оптимизируемыми параметрами являлись коэффициенты полинома, описывающие фазу волнового фронта ДОЭ:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i}, \quad (3.1)$$

где N – число членов (коэффициентов) ряда; ρ – нормированная радиальная координата апертуры поверхности; A_i – коэффициент члена ряда при ρ .

В качестве критерия оптимизации было выбрано следующее требование: величина сфокусированного пятна в фокальной плоскости должна быть минимальной для длины волны $\lambda_{\max} = 650$ нм. При моделировании диапазона разложения по длинам волн задается фиктивная плоскость на расстоянии Δz от фокальной плоскости микрообъектива и определяется оператор оптимизации кружка рассеяния на этой поверхности для длины волны $\lambda_{\min} = 450$ нм из диапазона ΔZ . В результате оптимизации вычисляются значения коэффициентов полинома.

Для оценки фокусного расстояния f РД-объектива необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{f_m} + \frac{1}{f_{\lambda_{\min}}} = \frac{1}{f} \\ \frac{1}{f_m} + \frac{1}{f_{\lambda_{\max}}} = \frac{1}{f + \Delta z} \end{cases}, \quad (3.2)$$

где f_m – фокусное расстояние микрообъектива; $f_{\lambda_{\min}}$ и $f_{\lambda_{\max}}$ – фокусные расстояния ДОЭ для длин волн $\lambda_{\min} = 450$ нм и $\lambda_{\max} = 650$ нм; Δz – длина хроматического отрезка.

Так как фокусное расстояние ДОЭ определяется формулой $f_{\lambda} = \frac{r_n^2}{2n\lambda}$ (где r_n – радиус n -й зоны; n – номер зоны), то, очевидно, что:

$$\frac{f_{\lambda \min}}{f_{\lambda \max}} = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = K. \quad (3.3)$$

С учетом выражения (3.3) формула для нахождения фокусного расстояния ДОО примет следующий вид:

$$f_{\lambda \min} = \frac{\sqrt{\left[1 + K + \frac{f_m}{\Delta z}(1-K)\right]^2 - 4K - \frac{f_m}{\Delta z}(1-K)}}{\frac{2K}{f_m}}. \quad (3.4)$$

На рисунке 3.2 приведен график зависимости фокуса ДОО от длины хроматического отрезка Δz . Из графика видно, что для получения более длинных хроматических отрезков необходимо для микробибликов выбирать ДОО с большей оптической силой.

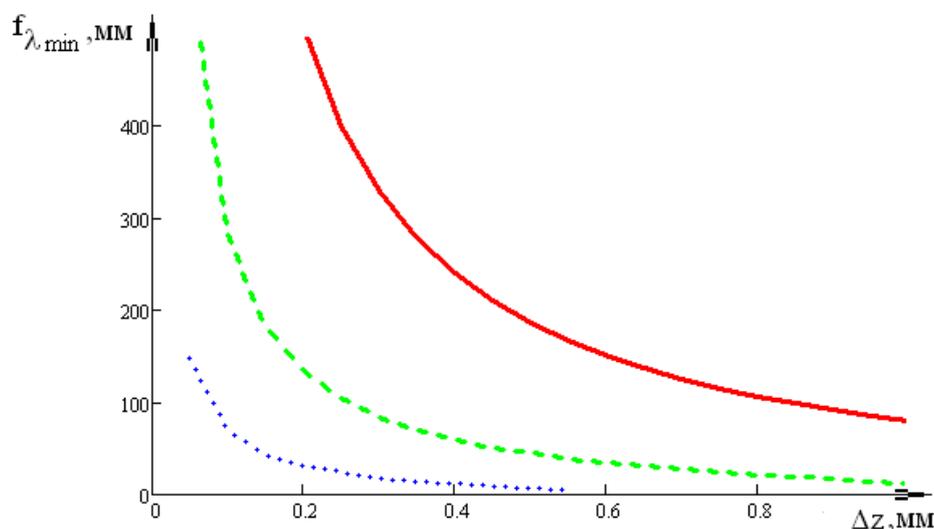


Рисунок 3.2 – Зависимость фокусного расстояния ДОО от выбранного диапазона измерений Δz для разных типов микробибликов: 10^x – сплошная линия, 20^x – штриховая, 40^x – пунктирная

3.1.2 Анализатор спектра на основе цветной видеокамеры

Реализация метода хроматического кодирования предполагает использование спектроанализатора. Нами предложено вместо спектрометра, в котором производится непосредственное измерение длины волны, использовать

цветную видеокамеру. Это позволяет заметно уменьшить себестоимость датчика и в целом упростить его конструкцию.

Как известно, цветное изображение с видеокамеры характеризуется яркостью, координатами цвета и координатами цветности, которые позволяют определить доминирующую длину волны, т.е. такую длину волны, на которой в спектре имеется преобладающее по мощности излучение [62, 63]. Для этого нами усреднялись значения координат цвета R , G и B по всем элементам цветного изображения камеры, а найденные средние значения компонент \bar{R} , \bar{G} и \bar{B} переводились в цветовую систему координат XYZ по следующим формулам [64]:

$$\begin{aligned} X &= 2,7687\bar{R} + 1,7516\bar{G} + 1,1301\bar{B}; \\ Y &= 1,0000\bar{R} + 4,5904\bar{G} + 0,0601\bar{B}; \\ Z &= 0,0000\bar{R} + 0,0565\bar{G} + 5,5939\bar{B}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

В данном трехкомпонентном цветовом пространстве положение любого цвета определено двумя координатами цветности x_{ob} , y_{ob} :

$$x_{ob} = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y_{ob} = \frac{Y}{X + Y + Z}. \quad (3.6)$$

При этом компонентой z_{ob} пренебрегают, поскольку между тремя координатами цветности существует линейная зависимость $x + y + z = 1$ и для однозначного определения положения цвета достаточно только двух координат X и Y [65].

На основе этих алгоритмов была разработана программа в среде C++ для апробации метода на макете. Следует отметить, что такой метод не достигает абсолютной точности определения доминирующей длины волны, измеряемой спектрометром. Однако он вполне подходит для сравнительных измерений смещений конфокальным датчиком. Спектральное разрешение камеры было оценено с помощью компьютерного моделирования шума матрицы. Для этого на изображение фокального пятна накладывался шум методом Монте-Карло [66] и

вычислялась доминирующая длина волны на 20 итерациях. Исходя из разницы между максимальной и минимальной длинам волн определялось разрешение, которое составило 0,01–0,06 нм при отношении сигнал/шум 30–50 dB (для рядовых камер) (рисунок 3.3). При этом погрешность измерения, обусловленная шумом камеры для измерительного диапазона $\Delta z = 200$ мкм, составляет от 7 до 42 нм.

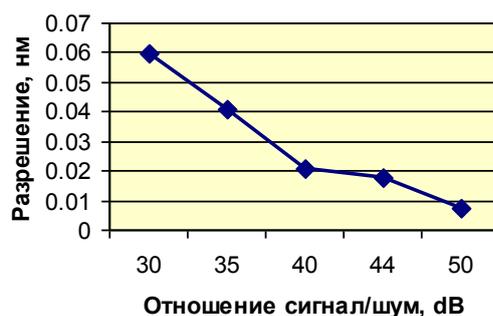


Рисунок 3.3 – Спектральное разрешение видеокамеры в зависимости от отношения сигнал/шум

Следует отметить, что ширина спектра, регистрируемого спектроанализатором, напрямую зависит от размера диафрагмы. Расчеты показали, что, например, при размере диафрагмы 10 мкм и размере пятна на камере 10 мкм ширина спектра пропускания составляет 7 нм.

3.2 Экспериментальные исследования конфокального датчика с использованием цветной видеокамеры и рефракционно-дифракционных объективов

Экспериментальные исследования конфокального метода осуществлялись на макете, описанном в пункте 3.1 данной главы. В качестве источника света использовалась галогенная лампа или белый светодиод, а в качестве спектроанализатора – цветная видеокамера (TUCSEN, 1,3 Мр). Объект смещался с помощью пьезоподвижек фирмы Physik Instrumente (PI) с шагом 1 мкм и погрешностью позиционирования 0,2 мкм.

ДООЭ для экспериментов были изготовлены на круговой лазерной записывающей системе, разработанной в КТИ ИП СО РАН совместно с ИАиЭ СО

РАН [1]. Значения коэффициентов полинома вычислялись в программе Zemax. В таблице 2 представлены коэффициенты полинома для получения хроматических отрезков Δz различной длины в РД-объективах.

Таблица 2 – Коэффициенты полинома, описывающие фазу волнового фронта ДОЭ для получения хроматических отрезков различной длины

№ РД-объектива	Длина хроматического отрезка Δz , мкм	Коэффициенты полинома		
		A_1	A_2	A_3
1	100	-206,92	0,045	-1,98
2	200	-520,95	0,72	-1,91
3	300	-358,54	0,236	-3,04
4	700	-1690,05	23,7	-0,45

С использованием круговых лазерных записывающих систем [1] был изготовлен ДОЭ с хроматическим отрезком $\Delta z = 700$ мкм.

В ходе настройки и юстировки макета датчика необходимо было осуществить юстировку микрообъектива по центру РД-объектива. Для этого на подвижке в его фокусе размещалась видеокамера. По наблюдаемой картине во время смещения камеры вдоль хроматического отрезка ДОЭ смещался до тех пор, пока размер, форма и «монохроматичность» пятна оставались неизменными.

Данные обрабатывались с помощью разработанного программного обеспечения, интерфейс которого представлен на рисунке 3.4.

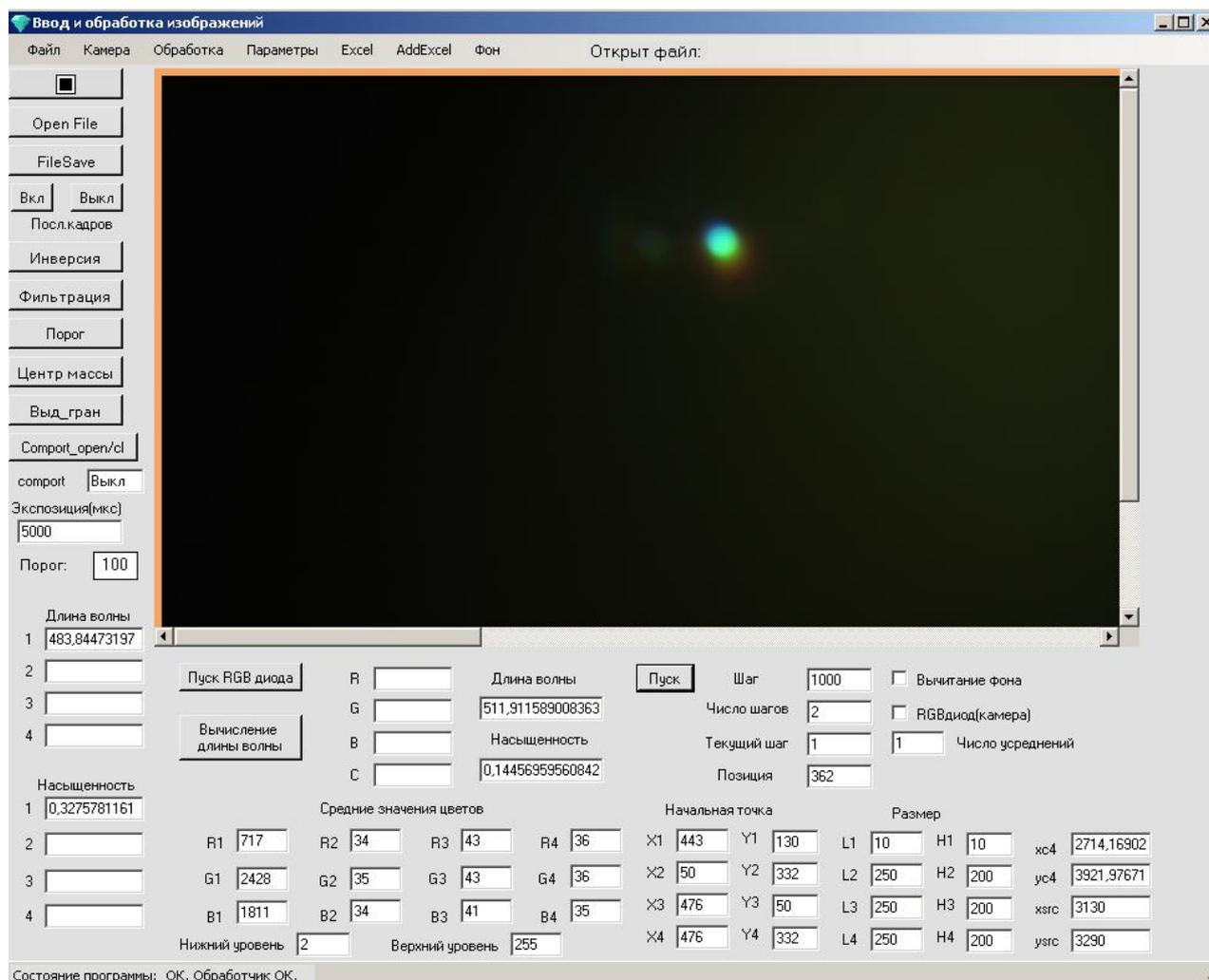


Рисунок 3.4 – Программное обеспечение для определения доминирующей длины волны с помощью цветной видеокамеры

Средние значения яркостей компонент R , G и B определялись по цветному изображению пятна на видеокамере.

3.2.1 Исследование погрешностей конфокального датчика

Рассмотрим схему экспериментального макета конфокального датчика на основе РД-объектива и цветной видеокамеры. На рисунке 3.5 представлена фотография макета.



Рисунок 3.5 – Фотография экспериментального макета конфокального датчика на основе РД-объектива и цветной видеокамеры

Свет от источника **1** с помощью объектива **2** фокусируется на торец многомодового оптоволоконного кабеля **3** диаметром 50 мкм. Оптоволокно представляет собой Y-образную структуру. Место сварки волокон – каплер **4** (оптический волоконный ответвитель) – выполняет роль светоделителя. Такая конфигурация волокна делит излучение в соотношении 1:1 для двух направлений. Излучение с одного из торцов волокна **5** попадает на РД-объектив **6**, который фокусирует белый свет в хроматический отрезок. В фокусе РД-объектива располагается объект **7**, который смещается с помощью пьезоподвижек **8** с шагом 0,23 мкм. Отраженный от объекта свет фокусируется РД-объективом на торец световолокна **5** и далее направляется на цветную видеокамеру **10**. Торец многомодового световолокна **5** играет роль конфокальной диафрагмы. Он фильтрует излучение, которое не удовлетворяет условию конфокальности. На камеру **10** с торца волокна **9** проходит практически монохроматический свет, который обрабатывается с помощью специального программного обеспечения.

На рисунке 3.6 представлен типичный график зависимости доминирующей длины волны от смещения поверхности. Из рисунка видно, что зависимость имеет линейный характер на отдельных участках. Это связано с неравномерностью спектральных характеристик как источников белого света, так и камеры. Поэтому

целью экспериментальных исследований было нахождение линейных участков и выявление погрешности определения расстояния до поверхности. Для этого экспериментально полученная кривая зависимости $\lambda(x)$ аппроксимировалась линейной функцией с помощью многочлена:

$$F(x) = \lambda(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3. \quad (3.7)$$

Мерой отклонения $F(x)$ от заданной функции при среднеквадратичном приближении являлась величина СКО, равная сумме квадратов разностей между значениями $F(x)$ и функции $\lambda(x)$ в каждой точке. Для построения аппроксимирующей кривой использовались встроенные функции программы Excel, с помощью которых подбирались коэффициенты a_0 , a_1 , a_2 и a_3 таким образом, чтобы величина СКО была наименьшей.

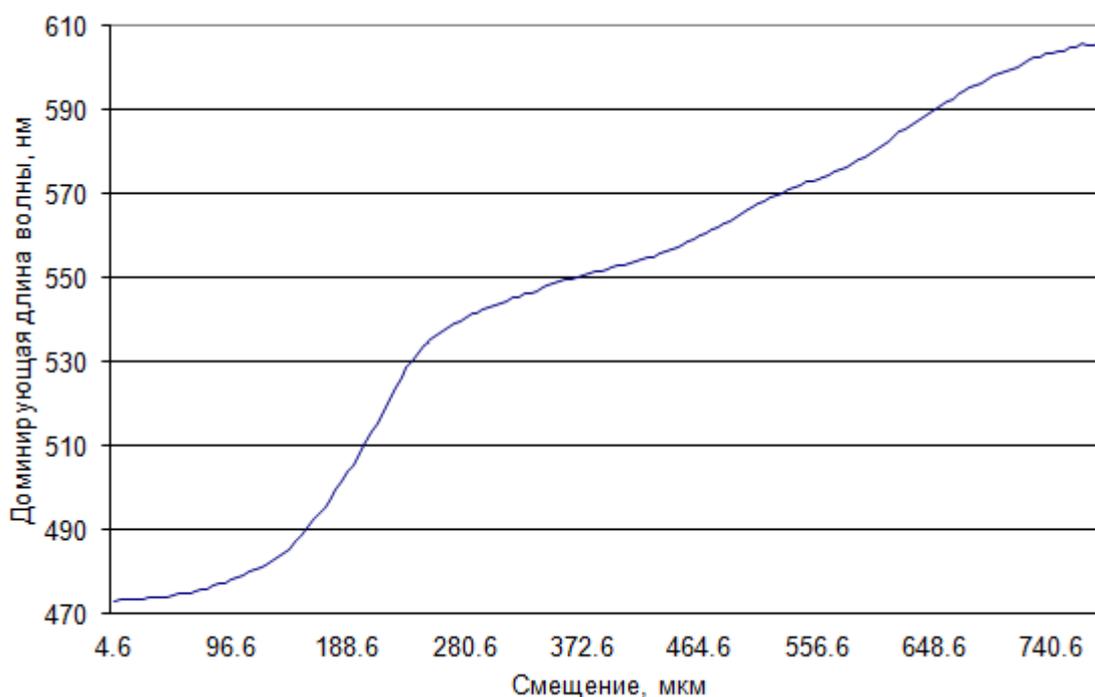


Рисунок 3.6 – График зависимости доминирующей длины волны от смещения поверхности объекта

На рисунке 3.7 приведен пример графика зависимости доминирующей длины волны от смещения поверхности, на котором выделен линейный участок

для микрообъектива 3,7 \times , а соответствующее распределение среднеквадратичного отклонения – на рисунке 3.8. Экспериментальные данные приведены в таблице 3.

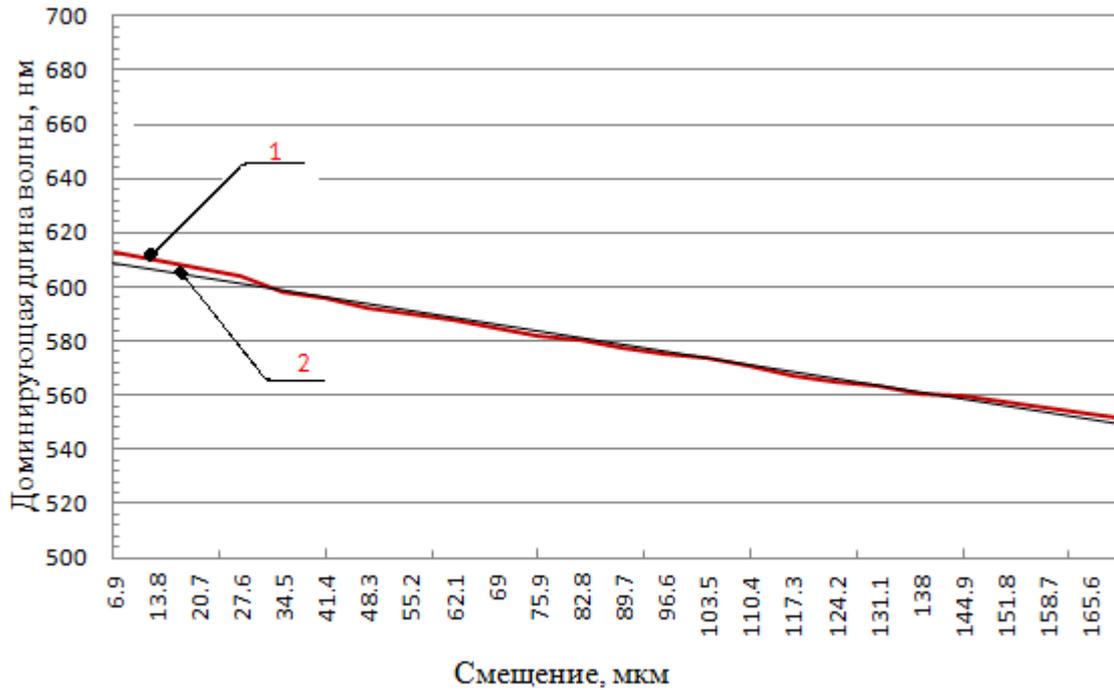


Рисунок 3.7 – Определение линейных участков на графиках зависимости доминирующей длины волны от смещения поверхности на линейном хроматическом участке РД-объектива на основе микрообъектива 3,7 \times : 1 – экспериментальная кривая; 2 – аппроксимация экспериментальной кривой

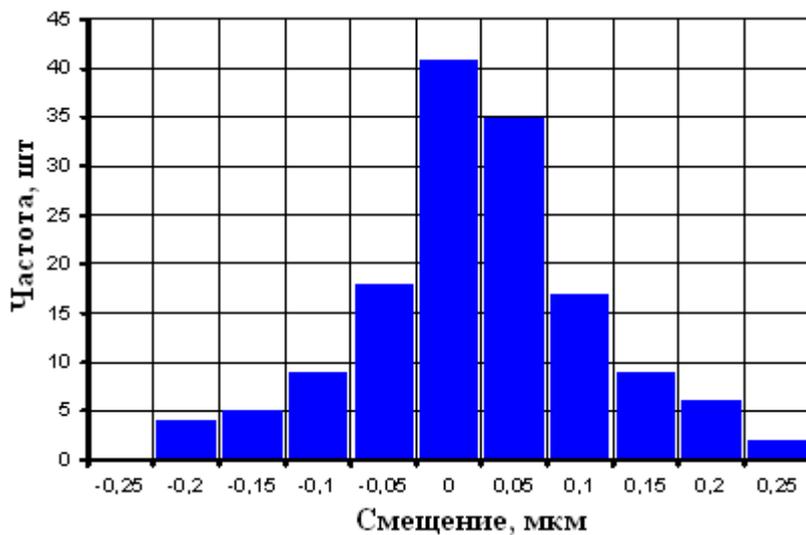


Рисунок 3.8 – Распределение СКО при определении смещений поверхности с помощью конфокального датчика

Для уменьшения влияния шумов камеры на разрешение конфокального датчика компоненты R , G , B определялись путем усреднения изображения пятен по 8 кадрам.

В таблицу 3 сведены итоговые параметры датчика, установленные в ходе экспериментальных исследований. Видно, что при усреднении по восьми кадрам изображения фокального пятна были получены следующие результаты: для объектива $3,7\times$ погрешность определения смещения объекта составила 1 мкм на линейном участке 200 мкм, для микрообъектива $10\times$ – 0,6 мкм на линейном участке 50 мкм и для микрообъектива $20\times$ – 0,1 на линейном участке 20 мкм.

Таблица 3 – Экспериментальные данные по итоговым параметрам датчика

Кратность микрообъектива	Базовое расстояние, мм	Диапазон измерений, мкм	Характерный размер линейной области, мкм	Погрешность, мкм (усреднение по восьми кадрам)
$3,7\times$	25	700	200	1
$10\times$	12	120	50	0,6
$20\times$	5	50	20	0,1

3.3 Расчет гиперхроматических объективов для конфокальных датчиков поверхности

Как было показано выше, ключевым элементом оптической схемы хроматического конфокального датчика является объектив с намеренно увеличенным хроматизмом положения. В предыдущем пункте описаны рефракционно-дифракционные объективы, позволяющие фокусировать белый свет в хроматические отрезки различной длины в зависимости от требований специфических применений. Основные преимущества данных объективов: простота реализации, компактность и линейная зависимость смещения фокуса от длины волны. Однако такие объективы обладают рядом недостатков. В первую очередь, это наличие паразитных дифракционных порядков, а также низкая эффективность на краях диапазона длин волн (400–700 нм). Расчет и проектирование гиперхроматических объективов, основанных на комбинации стекол с различной дисперсией, является предпочтительным при использовании

широкого диапазона длин волн $\Delta\lambda$ (в пределах видимой области спектра 400–700 нм).

Рассмотрим более подробно подходы к расчету гиперхроматических объективов. Как известно, хроматизм положения в линзовых системах возникает вследствие зависимости показателя преломления используемых стекол от длины волны $n(\lambda)$. Так, для одиночной линзы изменение ее фокусного расстояния описывается формулой:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{\nu}, \quad (3.8)$$

где $\nu = \frac{n_D}{n_F - n_C}$ – число Аббе, n_D , n_F , n_C – показатели преломления среды на длинах волн, соответствующих фраунгоферовым линиям C (656,3 нм), D (589,2 нм) и F (486,1 нм).

Для современных оптических стекол возможно достижение $\frac{\Delta f}{f}$ вплоть до 4,9 % (сверхтяжелый флинт СТФ2 из отечественного каталога ГОСТ 3514–94 или стекло SF66 из каталога Schott). При расширении диапазона длин волн до 400÷700 нм относительное изменение фокусного расстояния достигает уже 12 %. Видно, что благодаря использованию дисперсии стекол можно достичь значительных величин хроматизма положения. Однако использование стекол одной марки имеет значительный недостаток – сильная нелинейность зависимости фокусного расстояния от длины волны $f(\lambda)$. Так, для одиночной линзы такая зависимость, как известно, имеет следующий вид:

$$f(\lambda) = [(n(\lambda) - 1)(\rho_1 - \rho_2)]^{-1}, \quad (3.9)$$

где ρ_1 , ρ_2 – кривизны поверхностей линзы; $n(\lambda)$ – зависимость показателя преломления от длины волны, которая обычно описывается эмпирическими формулами Шотта [67]:

$$n(\lambda)^2 = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8}, \quad (3.10)$$

или Зельмейера [67]:

$$n(\lambda)^2 - 1 = \frac{K_1\lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2\lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3\lambda^2}{\lambda^2 - L_3}, \quad (3.11)$$

где a_i , K_i , L_i – коэффициенты, найденные эмпирически для каждого из материалов (приводятся в каталогах производителей оптических стекол).

На рисунке 3.9 приведены графики зависимостей фокусных расстояний линз из различных стекол от длины волны.

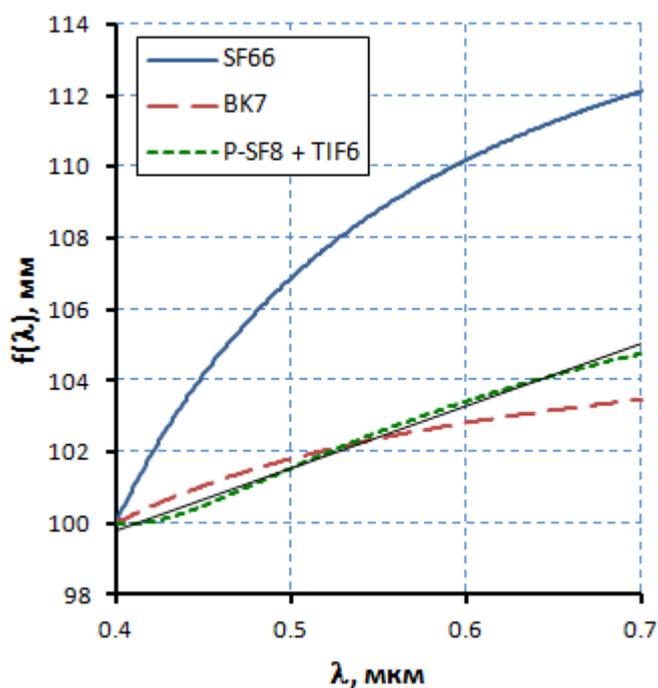


Рисунок 3.9 – Зависимости фокусных расстояний от длины волны для различных стекол: крон BK7 (аналог отечественного К8), сверхтяжелый флинт SF66, склейка P-SF8 + TIF6

Из представленных графиков видно, что зависимости $f(\lambda)$ одиночных линз имеют большую нелинейность – до 20 % (производные функций на краях диапазона различаются в 4–7 раз). Очевидно, что использование одной марки

стекла при разработке гиперспектральных объективов возможно только при существенном ограничении используемого спектрального диапазона, что не является предпочтительным, в первую очередь, с точки зрения энергетики оптической системы.

Задача расчета гиперспектральных объективов, суть которой состоит в получении линейной (или близкой к ней) зависимости $f(\lambda)$, близка к задаче расчета ахроматических объективов, где стремятся минимизировать изменения фокусного расстояния или заднего отрезка $S'_{F'}$ от длины волны:

$$\frac{df(\lambda)}{d\lambda} \rightarrow 0. \quad (3.12)$$

В задаче расчета гиперспектральных объективов, наоборот, стремятся получить значительное изменение, но оно должно быть постоянным в рабочем диапазоне длин волн $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$:

$$\frac{df(\lambda)}{d\lambda} \rightarrow \frac{\Delta z}{\Delta\lambda}. \quad (3.13)$$

Покажем на примере расчета склейки, как можно добиться увеличения линейности $f(\lambda)$. В приближении тонких компонентов оптические силы линз в склейке складываются:

$$\frac{1}{f(\lambda)} = \frac{1}{f_1(\lambda)} + \frac{1}{f_2(\lambda)}. \quad (3.14)$$

Подбирая марки материалов $n_1(\lambda)$ и $n_2(\lambda)$, а также соотношение радиусов кривизны линз, можно добиться значительного увеличения линейности. Так, на рисунке 3.9 представлен график зависимости $f(\lambda)$ для склейки из стекол P-SF8 и ТГФ6. Можно видеть, что для склейки можно получить функцию $f(\lambda)$, достаточно близкую к линейной зависимости (нелинейность снижается до 6 %). Для

датчиков, работающих в режиме измерения расстояний, как правило, нелинейность не должна превышать 1 %. Таких значений можно добиться только в более сложных оптических схемах ГХО с использованием трех-четырёх линз и, как минимум, трех марок оптических материалов.

При расчете ГХО, помимо линейности диапазона, также необходимо добиваться минимизации сферической aberrаций и сферохроматизма (зависимость сферической aberrации от длины волны). Сферохроматизм особенно проявляется при расчете ГХО с большим рабочим диапазоном: $\frac{\Delta z}{f} > 5\%$. Если качество пятен рассеяния во всем диапазоне $\Delta\lambda$ будет близко к дифракционному пределу, то будут минимизированы потери света при обратном ходе лучей от объекта к волокну, а также не произойдет ухудшения поперечного разрешения в плоскости объекта.

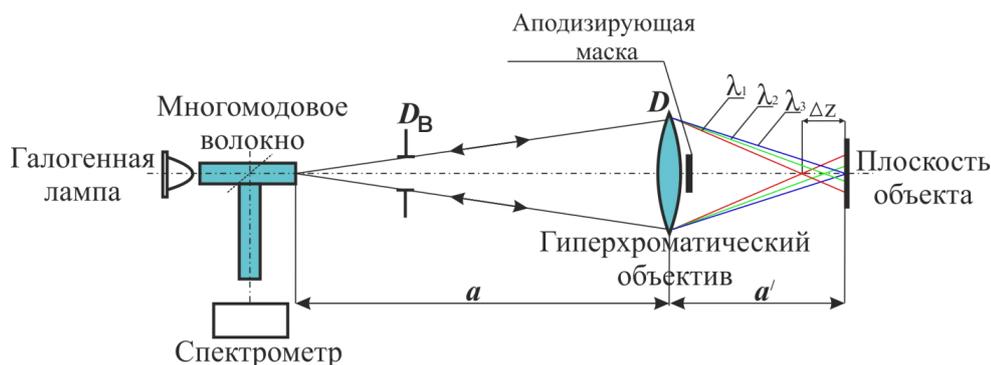


Рисунок 3.10 – Оптическая схема конфокального датчика на основе гиперхроматического объектива

Еще одним важным аспектом при расчете ГХО является выбор апертуры объектива, как со стороны оптоволокну, так и со стороны объекта. Обратимся к рисунку 3.10, на котором представлена оптическая схема конфокального датчика на основе гиперхроматического объектива. С целью уменьшения потерь энергии входная апертура объектива $NA_{вх}$ с диаметром D должна быть близка к числовой апертуре используемого волокна с диаметром D_B : $NA_{вх} \approx NA_{вол}$. Выходная же апертура должна выбираться исходя из дифракционного разрешения объектива вдоль оптической оси, которое должно быть значительно меньше рабочего отрезка:

$$\eta = \frac{\Delta z}{\Delta z_{\text{дифр}}} \gg 1, \quad (3.15)$$

где $\Delta z_{\text{дифр}}$ – дифракционно-ограниченная глубина резкости ГХО, $\Delta z_{\text{дифр}} = 4\lambda K^2$, где K – диафрагменное число, равное отношению фокусного расстояния объектива к диаметру его входного зрачка, $K = \frac{f}{D}$.

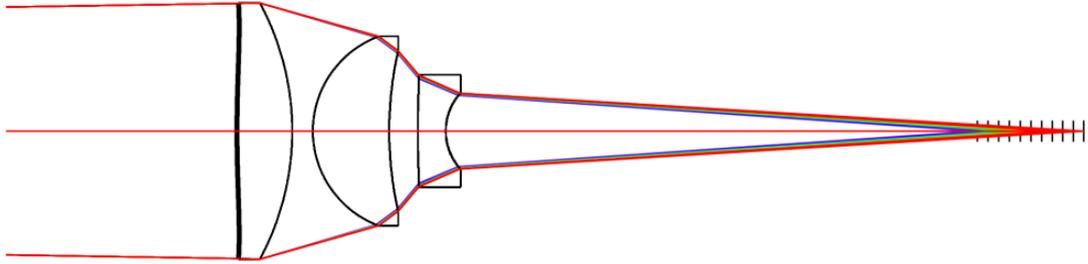
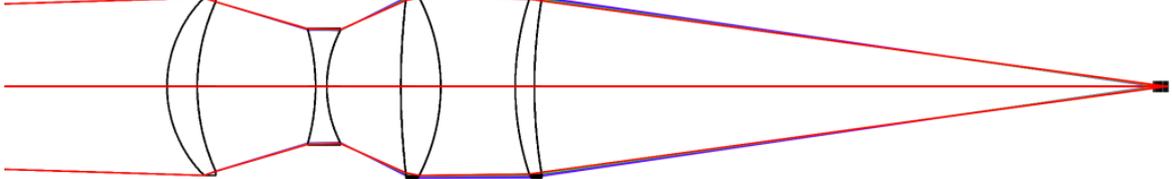
Большие значения $\eta \gg 1$ легко достичь простым масштабированием (увеличением) оптических схем ГХО. Однако в этом случае ухудшаются энергетические характеристики датчика, так как на фотоприемник попадает все более узкий участок спектра. Поэтому на практике соотношение η достигает значений 5–30.

Используя описанные выше подходы и требования к ГХО, 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 4. В ней представлены три варианта: ГХО-склейка; трехлинзовый и четырехлинзовый ГХО (жирными линиями отмечены асферические поверхности) [68].

Таблица 4 – Оптические схемы ГХО и их основные характеристики

ГХО-склейка	
	<p>ГХО1: $\frac{\Delta z}{f} = 5 \%$; $K = 9$; нелинейность 2,5 %</p> <p>Марки используемых стекол: SF3, LAK10</p>

Таблица 4 – Оптические схемы ГХО и их основные характеристики (продолжение)

Трехлинзовый ГХО	
	<p>ГХО2: $\frac{\Delta z}{f} = 10 \%$; $K = 7$; нелинейность 1 %</p> <p>Марки используемых стекол: KZFS2, FK5, LASF35</p>
Четырехлинзовый ГХО	
Четырехлинзовый ГХО	<p>ГХО3: $\frac{\Delta z}{f} = 2,5 \%$; $K = 3,4$; нелинейность 1,1 %</p> <p>Марки используемых стекол: LAK31, SF6HT, SF11</p>

Из таблицы видно, что даже с помощью склейки можно добиться малой нелинейности. При этом отношение $\frac{\Delta z}{f}$ составляет 2,5 %. 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, нелинейность составляет 1 %. При этом возрастает его себестоимость. В четырехлинзовом ГХО используются так же три марки стекол, количество элементов возрастает до четырех при нелинейности 1,1 %. Необходимо отметить, что для высокоапертурных ГХО требуется применение трех-четырёх линз для

компенсации сферической аберрации и сферохроматизма. Одна из особенностей предложенного подхода заключается в возможности масштабирования оптической системы ГХО, позволяющей получать хроматические отрезки Δz различной длины (используя любую из приведенных выше оптических схем ГХО и исходя из требований специфических применений).

На рисунке 3.11 представлен ход кривых $S'(\lambda)$ за вычетом линейной составляющей. Видно, что для ГХО3, который состоит из четырех линз, нелинейность снижается в три раза. Такой вариант объектива позволит добиться большей точности измерений.

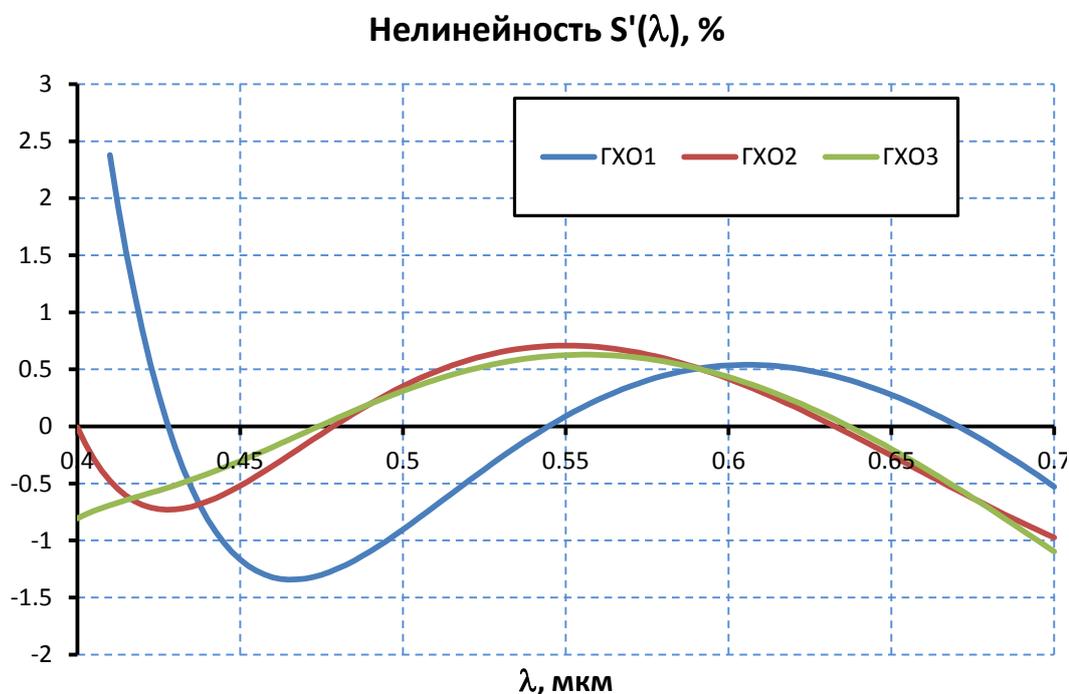


Рисунок 3.11 – Отклонения от линейной составляющей графика зависимости смещения фокуса от длины волны

3.3.1 Повышение разрешения конфокального датчика

Одним из важнейших критериев эффективности работы датчиков является его разрешающая способность. В данном пункте путем моделирования конфокального датчика в программном обеспечении для расчета оптических систем Zemax Optical Studio получена аналитическая зависимость спектральной мощности выходного сигнала от длины волны. Предполагается, что чем уже спектральный пик, тем выше осевое разрешение датчика. Цель моделирования

состояла в выявлении параметров выходного сигнала с датчика, влияющих на его осевое разрешение.

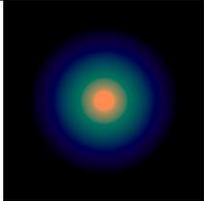
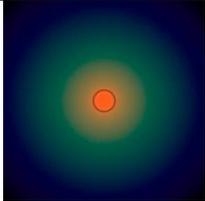
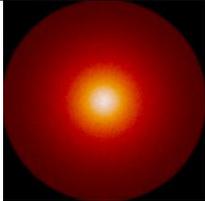
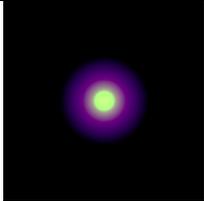
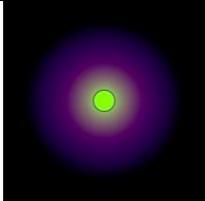
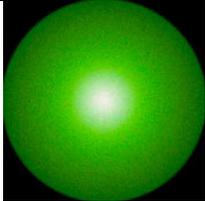
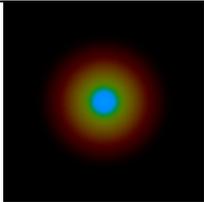
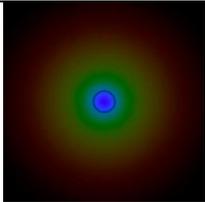
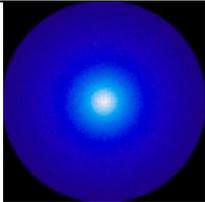
Как уже было отмечено выше, метод хроматического кодирования заключается в расщеплении потока белого света на хроматические составляющие в измерительном диапазоне Δz . В зависимости от расстояния между ГХО и образцом на поверхности последнего фокусируется свет только с определенной длиной волны λ_{\min} из всего спектрального диапазона $[\lambda_{\min} \dots \lambda_{\max}]$. Все другие спектральные компоненты освещают широкую площадь поверхности. Использование конфокального принципа приводит к прохождению на спектроанализатор квазимонохроматического света с длиной волны λ_{\min} .

С помощью ПО Zemax Optical Studio было проведено моделирование изображения светового пятна в конфокальном датчике с целью оценки степени его хроматичности как в плоскости объекта, так и в плоскости конфокальной диафрагмы. Как было отмечено выше, роль диафрагмы выполняет торец волокна диаметром 50 мкм. В таблице 5 представлены изображения светового пятна на объекте, на торце и на выходе волокна для различных областей спектра.

Изображения на выходе волокна демонстрируют практически монохроматический свет на периферии пятна и белый свет – в его центре. Отсюда можно сделать вывод, что, несмотря на конфокальное сопряжение, на спектроанализатор попадает свет с широким спектром из центральной области ГХО.

Для уменьшения влияния белого света на результирующий сигнал спектроанализатора было предложено ввести в центральную часть гиперхроматического объектива аподизирующую маску. На рисунке 3.12 представлено спектральное распределение мощности выходного сигнала без аподизации (кривая **1**) и с аподизирующими масками размером $0,4D$ (кривая **2**) и $0,6D$ (кривая **3**), где D – размер входной апертуры ГХО.

Таблица 5 – Модельные изображения световых пятен на объекте, на торце и на выходе волокна

Область спектра	на объекте	на торце волокна	на выходе волокна
Красная			
Зеленая			
Синяя			

Спектральное распределение мощности сигнала, отн. ед.

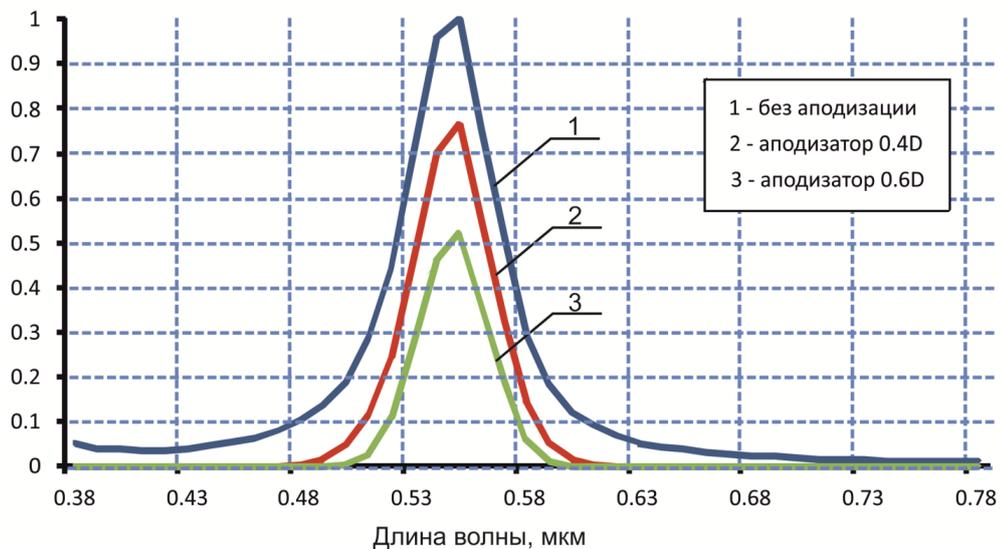


Рисунок 3.12 – Спектральное распределение мощности сигнала на выходе волокна без аподизации (1) и с аподизирующими масками диаметром 0,4D (2) и 0,6D (3)

Видно, что аподизация позволяет уменьшить ширину спектральной кривой примерно в 1,5 раза (при диаметре аподизирующей маски 0,6D). Далее

экспериментальным путем будет показано, как уменьшение ширины спектральной кривой приводит к повышению разрешения конфокального датчика [69].

Цветовой локус, представленный на рисунке 3.13 (кривая 1), демонстрирует степень хроматичности сигнала на выходе волокна с аподизацией $0,6D$ (кривая 2) и без аподизации (кривая 3). Видно, что цветовой охват конфокального датчика с аподизацией ГХО уменьшается. Источник белого света обозначен на графике как D65.

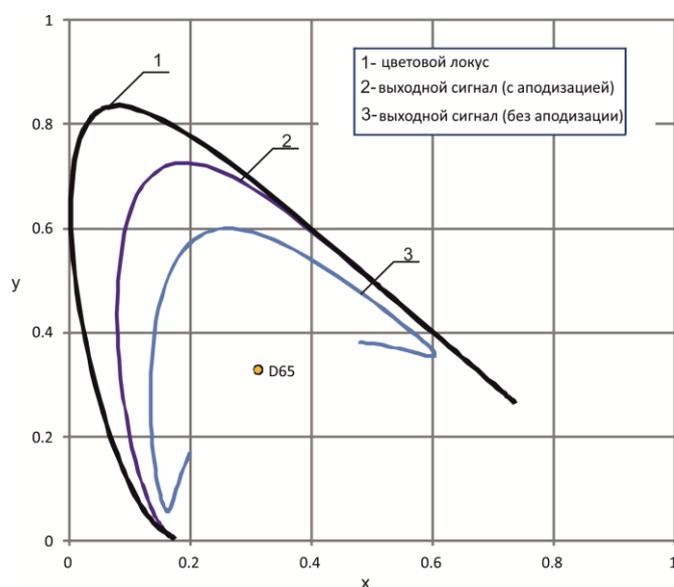


Рисунок 3.13 – Цветовой локус и распределение цветов на спектроанализаторе волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования (результаты моделирования)

Результаты моделирования были положены в основу экспериментальных исследований, в ходе которых было показано влияние аподизирующей маски на разрешающую способность датчика.

3.3.2 Экспериментальные исследования конфокального датчика с использованием гиперхроматических объективов и спектрометра

В КТИ НП СО РАН был рассчитан и изготовлен трехлинзовый ГХО с длиной хроматического отрезка 300 мкм, внешний вид которого показан на рисунке 3.14, а.



а)



б)

Рисунок 3.14 – Основные элементы конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования: а) трехлинзовый гиперхроматический объектив; б) измерительная головка с волоконным выводом

На рисунке 3.14, б представлен внешний вид головки конфокального датчика в волоконном исполнении. Отдельные линзы ГХО изготовлены из доступных отечественных стекол двух марок: ТФ10 и К8. Оптическая схема ГХО и его основные характеристики представлены на рисунке 3.15.

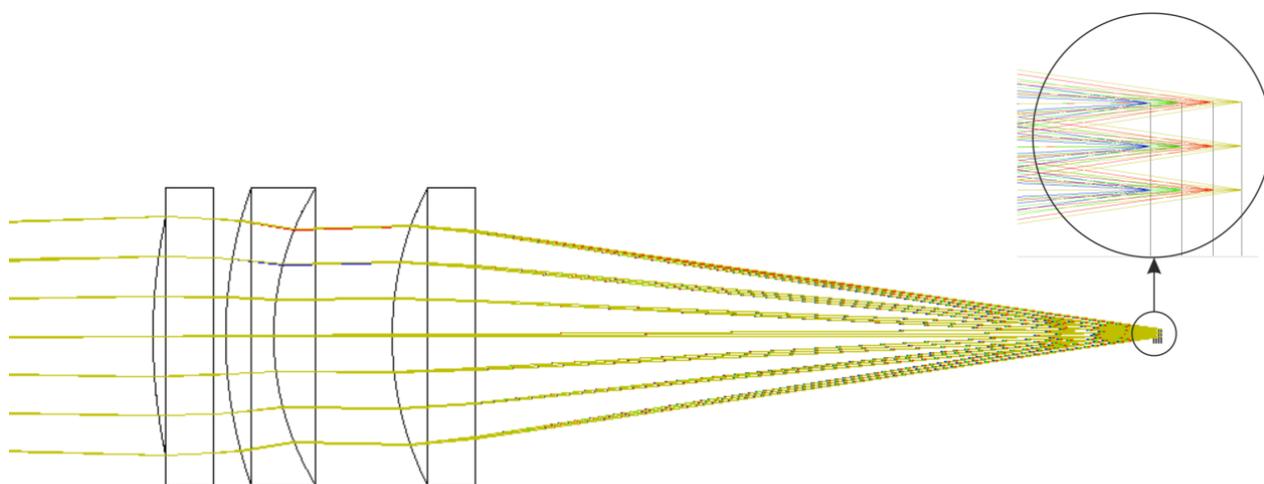


Рисунок 3.15 – Оптическая схема трехлинзового ГХО и его основные характеристики: рабочий отрезок – 30 мм, $\Delta z = 300$ мкм, фокусное расстояние – 24 мм, увеличение $0,2^x$, $K = 3,3$

Для проверки аналитических моделей спектрального распределения мощности на выходе волокна была разработана установка на основе волоконного конфокального датчика, представленная на рисунке 3.16. Свет от галогенной лампы **1** DL150 (Dedolight, Германия) собирается в торец **2** волоконного каплера

FCMM50-50A-FC (Thorlabs, Германия) с диаметром сердечника 50 мкм и числовой апертурой $NA = 0,22$. Для контроля эффективности ввода света в волокно разработано устройство **3**, позволяющее измерять мощность потока на одном из его выходов **4**.

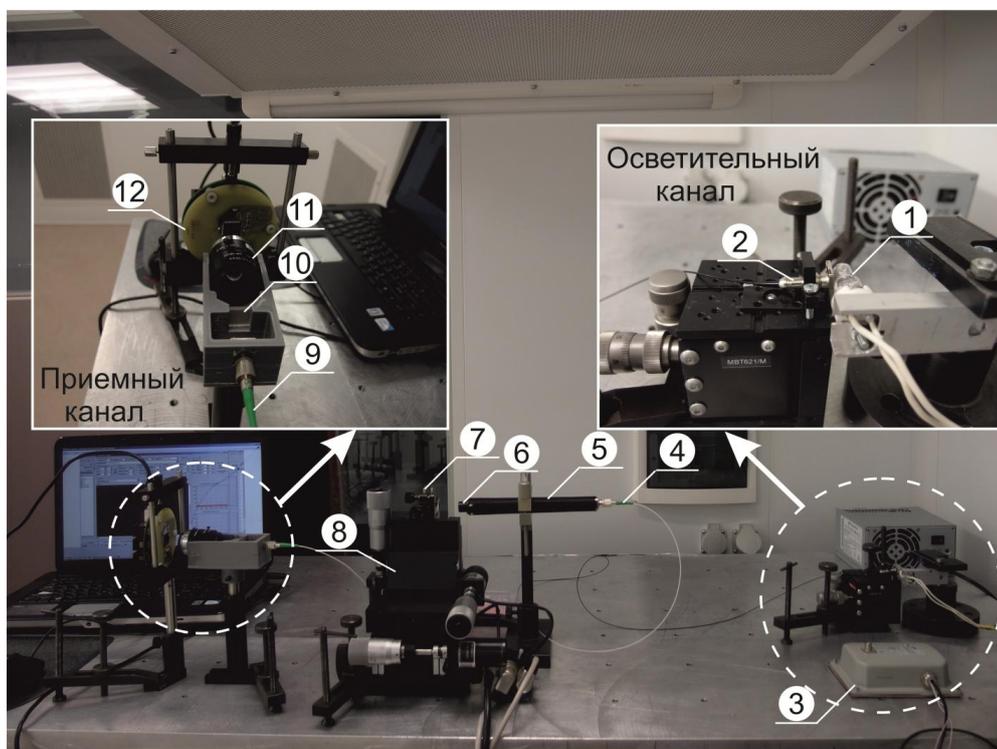


Рисунок 3.16 – Внешний вид волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования: 1 – галогенная лампа DL150 (Dedolight, Германия); 2, 4, 9 – выходы волоконного каплера FCMM50-50A-FC (Thorlabs, Германия); 3 – устройство для контроля эффективности ввода излучения в волокно (КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск); 5 – головка конфокального датчика; 6 – гиперхроматический объектив (КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск); 7 – держатель KM100CL (Thorlabs, Германия) с тестируемым образцом; 8 – трехкоординатный столик ZSS 33.200.1.2 (Phytron, Германия); 10 – дифракционная решетка GT13-06V (Thorlabs, Германия); 11 – объектив MVL25M23 (Navitar, Япония); 12 – видеокамера КЦ-1310 (КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск)

Свет в волокне проходит через светоделитель в каплере (место спайки двух волокон), часть его направляется на выход волокна **4** в головку волоконного конфокального датчика **5**. ГХО (фокусное расстояние – 24 мм, увеличение – $0,2\times$) фокусирует излучение в линию спектрально разделенных фокусов длиной 300 мкм. Один из фокусов совпадает с плоскостью тестируемого образца **7**. Отраженный или обратно рассеянный свет проходит ГХО второй раз, и только

одна длина волны в фокусе тестируемой поверхности фокусируется на торец волокна **4**. Свет этой длины волны эффективно вводится в волокно, тогда как все другие длины волн подвергаются расфокусировке и сильному ослаблению. Длина волны прошедшего света является кодом расстояния между ГХО и тестируемым образцом. После прохождения каплера спектральное распределение мощности сигнала анализируется в приемном канале, состоящем из дифракционной решетки **10** GT13-06V с разрешением 600 линий/мм (Thorlabs, Германия), объектива **11** MVL25M23 (Navitar, Япония) с фокусным расстоянием 25 мм и относительным отверстием 1,4, а также видеокамеры **12** КЦ-1310 (КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск) на базе монохромных матриц фирмы Micron с разрешением 1280×1024 пикселей. Спектральное распределение мощности для одного из положений тестируемого образца **7** регистрируется и обрабатывается (вычитается фоновое значение спектральной мощности сигнала).

На рисунке 3.17 представлено спектральное распределение мощности выходного сигнала для трех случаев: без аподизации ГХО (кривая **1**), с аподизацией $0,4D$ (кривая **2**) и $0,6D$ (кривая **3**). Можно видеть, что ширина спектра уменьшается со 118 до 57 нм. Алгоритм поиска пикового значения мощности и ширины спектра основан на методе центра масс. Форма пика близка к аналитической.

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований было подтверждено прогнозируемое уменьшение ширины спектрального распределения мощности сигнала за счет аподизации центральной части ГХО, что позволяет повысить осевую разрешающую способность волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования. Интенсивность сигнала, уменьшающаяся в два раза для случая аподизации ГХО $0,6D$, приводит к увеличению отношения сигнал/шум. Поэтому при эксплуатации датчика необходимо соблюдать разумный компромисс между его разрешающей способностью и уровнем сигнала.

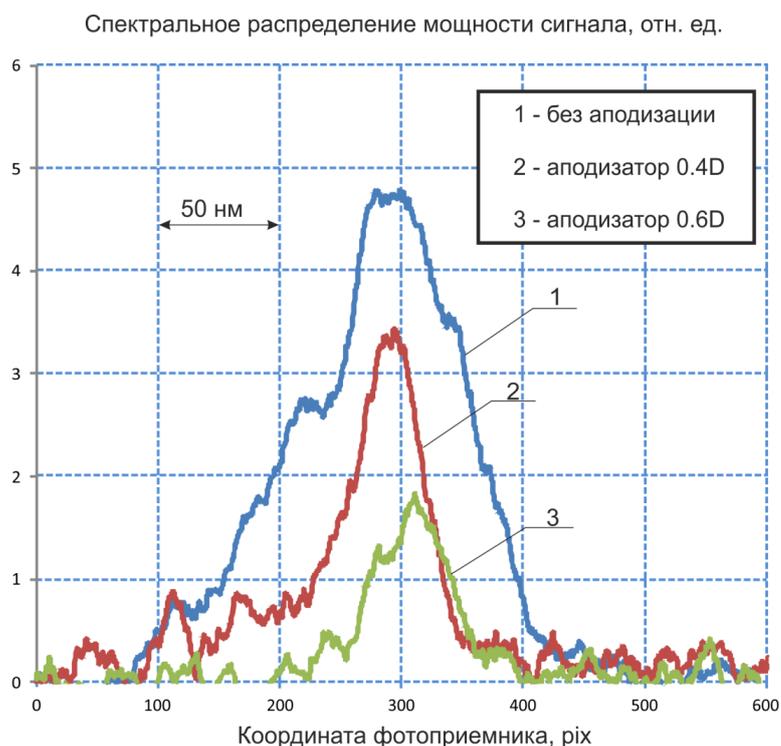


Рисунок 3.17 – Спектральное распределение мощности сигнала на выходе волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования с использованием аподизирующих масок различного диаметра

3.3.3 Исследование погрешностей конфокального датчика при аподизации гиперхроматического объектива

Выше путем программного моделирования было показано, что аподизация центральной части гиперхроматического объектива позволяет уменьшить ширину спектрального распределения мощности, регистрируемого фотоприемником. Потенциально это позволит увеличить разрешающую способность конфокального датчика. График, приведенный на рисунке 3.17, получен для случая неподвижного объекта. Рассмотрим спектральное распределение мощности сигнала при смещении объекта вдоль оси z .

На рисунке 3.16 представлена схема установки, на которой проводились экспериментальные исследования погрешности конфокального датчика при аподизации гиперхроматического объектива. В нее был введен интерферометр (модель RLE-10-SX-CX, RENISHAW) для контроля смещения трехкоординатного столика ZSS 33.200.1.2.

Типичный график зависимости смещения объекта, определенного с помощью интерферометра, от доминирующей длины волны представлен на рисунке 3.18.

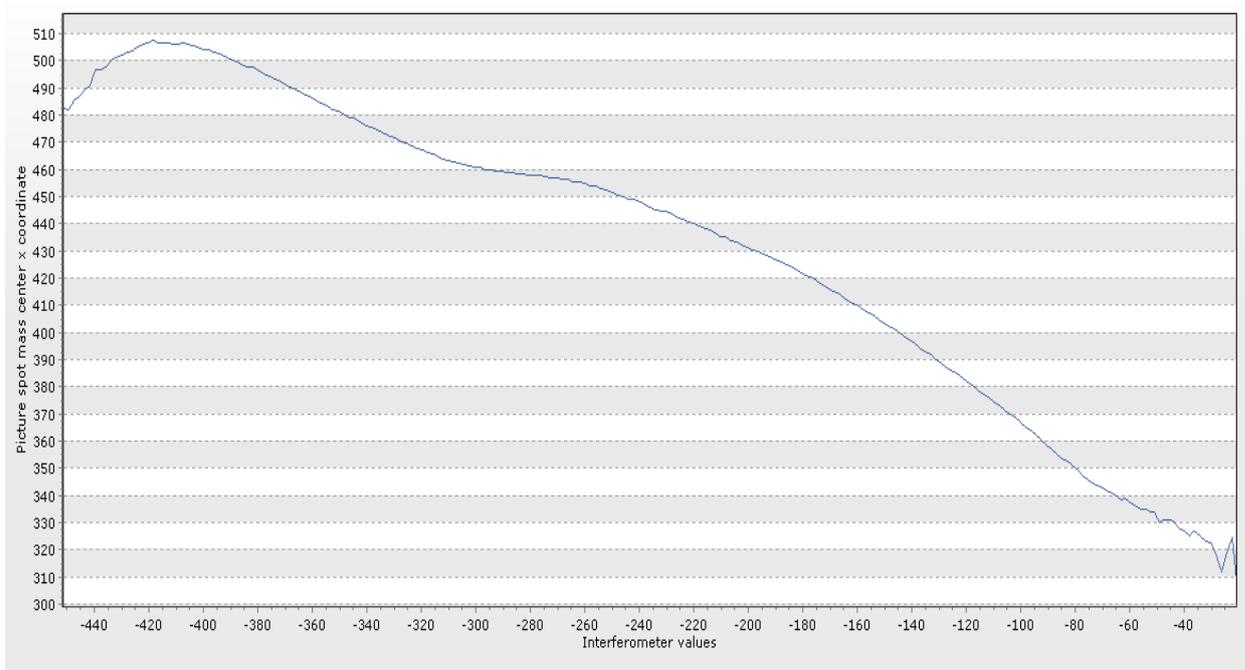


Рисунок 3.18 – Зависимость координаты центра масс спектрального распределения мощности сигнала от смещения поверхности, контролируемого с помощью интерферометра (модель RLE-10-SX-CX, RENISHAW)

Далее спектральное распределение мощности при смещении тестируемого образца обрабатывалось с помощью специального программного обеспечения. Всего было исследовано три алгоритма, основанных на поиске ярчайшей точки, положении центра масс и линейной аппроксимации дифференциального сигнала. Полученные координаты пика использовались для оценки погрешности измерений по алгоритму, описанному в подпункте 3.2.1 данной главы.

Алгоритм поиска ярчайшей точки предусматривает выбор в качестве пика самый яркий пиксель из имеющихся. Из-за отсутствия какой-либо дальнейшей обработки этот алгоритм является самым быстрым. Но при этом его применение ведет к повышению погрешности измерений.

Алгоритм поиска центра масс принимает за пик центр масс яркостей пикселей, вычисленный по формуле $r_c = \frac{\sum m_i \times r_i}{\sum m_i}$, где r_c – координаты центра масс; m_i – яркость пикселя; r_i – координаты пикселя. Данный алгоритм несколько медленнее алгоритма поиска ярчайшей точки, но при этом его точность выше.

Алгоритм линейной аппроксимации дифференциального сигнала (LFDS) выполняется в три этапа. На первом этапе вычисляется разностная аппроксимация первой производной по формуле $\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x+\Delta) - f(x-\Delta)}{2\Delta}$, где $\frac{df(x)}{dx}$ – значение производной в точке x ; $f(x)$ – значение функции в точке x ; Δ – шаг аппроксимации. Затем полученный массив значений производных в точках используется для линейной аппроксимации методом наименьших квадратов. И наконец, на третьем этапе вычисляется координата точки пересечения полученной прямой с нулем, которая и является искомым пиком. Данный алгоритм самый трудоемкий по времени из всех представленных, однако его точность является лучшей.

В результате экспериментальных исследований установлено, что использование аподизирующей маски позволяет снизить погрешность измерения расстояния до поверхности в три раза и более. При отсутствии аподизирующей маски в центральной части ГХО среднеквадратичное отклонение составляет 0,9 мкм в линейном измерительном диапазоне 225 мкм. При введении аподизирующей маски диаметром $0,4D$ СКО уменьшается до 0,2 мкм при сокращении линейного диапазона до 120 мкм.

3.4 Ближнепольная сканирующая приставка

Разработанный конфокальный датчик вошел в состав ближнепольной сканирующей приставки для терагерцового микроскопа с блоком нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) (далее – ближнепольный микроскоп). Схема ближнепольного микроскопа показана на рисунке 3.19. Источником терагерцового излучения служит Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ) [70]. Излучение ЛСЭ представляет собой последовательность 100-пс

импульсов, следующих с частотой повторения 5,6 МГц. Пучок имеет гауссову форму (радиус 9 мм) и линейно поляризован. При этом излучение ЛСЭ монохроматическое с относительной спектральной шириной 0,3–1 % и может плавно перестраиваться по длине волны в диапазонах 120–240 и 20–100 мкм. Средняя мощность излучения на рабочей станции в стандартных режимах обычно составляет 10–100 Вт.

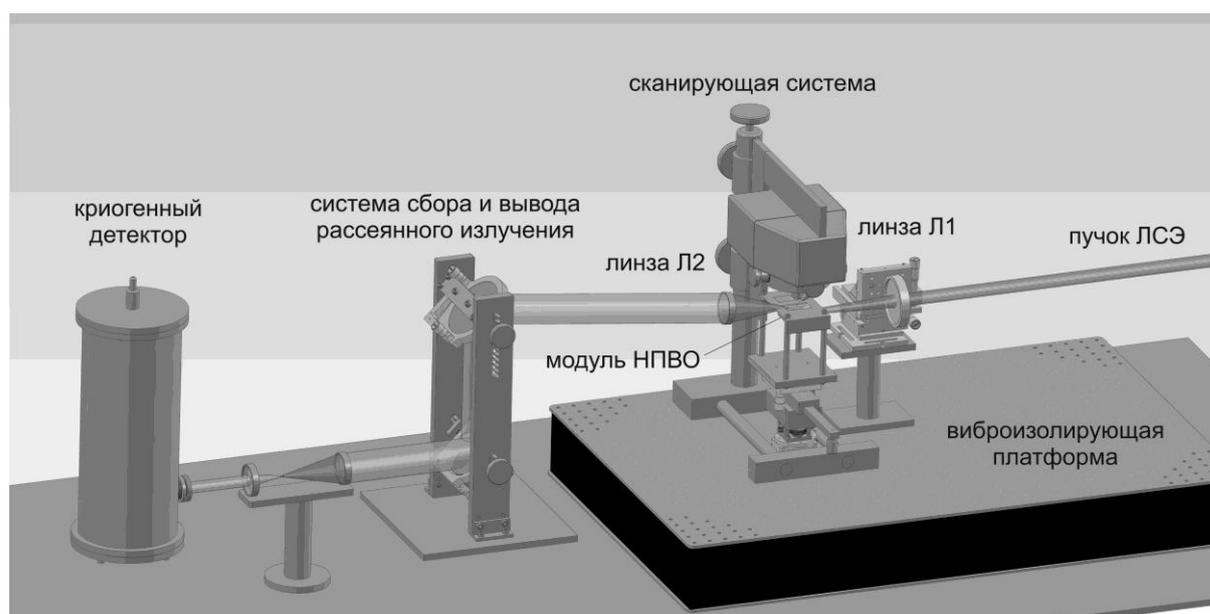


Рисунок 3.19 – Общая схема терагерцового ближнепольного микроскопа

Излучение ЛСЭ фокусируется с помощью линзы **Л1** с фокусным расстоянием $f_1 = 150$ мм на поверхность кремниевой призмы с образцом, которые входят в состав НПВО модуля. На поверхности призмы возникает эванесцентная волна, в область которой с помощью системы позиционирования вводится металлический зонд. Зонд позволяет преодолеть дифракционный предел при исследовании объектов в терагерцовом диапазоне. Конфокальный датчик позволяет контролировать расстояние между зондом и поверхностью исследуемого образца. При длине волны 140 мкм глубина проникновения эванесцентной волны в воздух составляет 10–20 мкм [71], а значит, размер исследуемых объектов может варьироваться от величины, равной диаметру кончика зонда, примерно до 10 мкм. Субволновой зонд в виде вольфрамовой иглы

с диаметром кончика $d = 0,1 \dots 1$ мкм рассеивает излучение, которое потом собирается с помощью второй линзы Л2 с $f_2 = 50$ мм. Диаметр линзы равен 50 мм, что позволяет захватить значительную часть рассеянной волны. Далее с помощью системы сбора и вывода рассеянного излучения пучок направляется на вход детектирующей системы. Модуль НПВО и сканирующая система расположены на виброизолирующей платформе с пневматическим подавлением колебаний (модель Newport M-VT-2024-OPT 02 BenchTop™). Модуль НПВО содержит две сменные призмы из кремния низкой проводимости с углами при вершине $\gamma = 90^\circ$ и 46° . Излучение ЛСЭ падает на входную грань призм вдоль оптической оси, параллельной верхней (рабочей) поверхности, тогда соответствующие углы полного внутреннего отражения θ_0 для призм равны 57° и 74° . Размер рабочей грани призмы, на которой при необходимости могут устанавливаться сменные кюветы, составляет 40×20 мм². Выходящее из призмы лазерное излучение поглощается системой поглотителей.

Для исследования с помощью ближнепольного микроскопа в качестве объектов могут использоваться тонкие полупроводниковые или диэлектрические пленки, прозрачные в терагерцовом диапазоне (из кремния, полиэтилена и др. материалов). Толщина пленки не должна превышать глубины проникновения эванесцентного поля над поверхностью призмы, которая в нашем случае составляет 20–60 мкм. Величина рассеянного зондом излучения в ближнем поле зависит от диэлектрических свойств образца, которые в свою очередь определяются его проводимостью, наличием примесей и т.д. Таким образом, с помощью ближнепольного микроскопа можно исследовать материалы и примеси (например, в полупроводниках [72, 73], полимерных пленках [74]), а также распределение свободных зарядов с концентрацией $10^{16} - 10^{19}$ см⁻³ [75, 76], при которой плазменная частота колебаний лежит в терагерцовом диапазоне частот. Потенциальной сферой применения данного микроскопа также является исследование полимерных наночастиц, вирусов и белковых молекул [77].

На рисунке 3.20 показана сканирующая система микроскопа, в состав которой вошёл конфокальный датчик **1**. Особенностью датчика, предложенного автором, является использование в качестве спектроанализатора цветной видеокамеры. Это значительно упрощает конструкцию датчика, уменьшает его массогабаритные характеристики. При этом спектральное разрешение камеры лежит в пределах 0,01–0,06 нм при отношении сигнал/шум 30–50 dB [78]. Экспериментально при сканировании достигнута чувствительность датчика к изменению уровня поверхности образца порядка 100 нм [79].

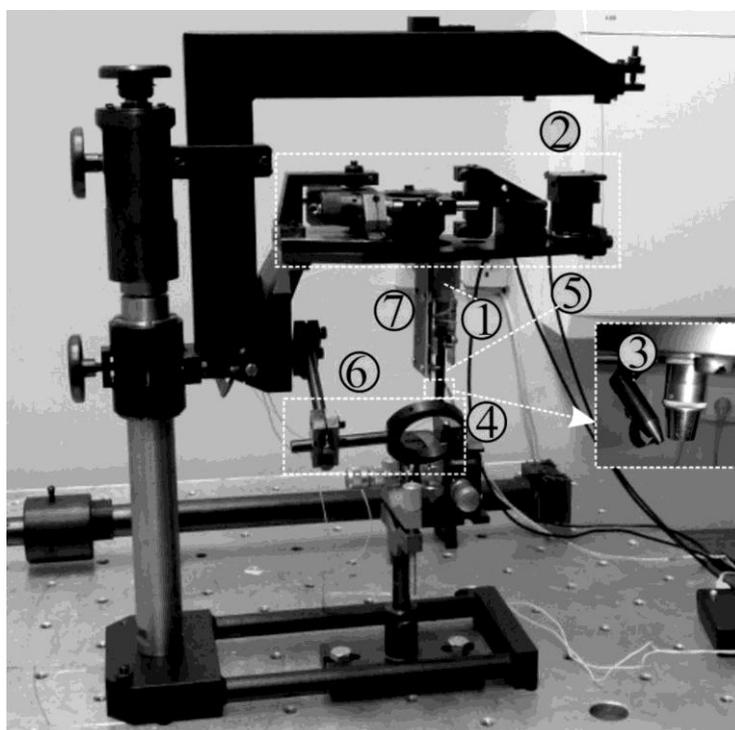


Рисунок 3.20 – Ближнепольная сканирующая приставка: 1 – конфокальный датчик; 2 – XYZ-позиционирующая платформа; 3 – субволновой зонд; 4 – НПВО-элемент; 5 – генератор колебаний; 6 – проецирующая оптика; 7 – датчик касания

Механическое позиционирование субволнового зонда **3** над поверхностью НПВО-элемента **4** обеспечивает XYZ-позиционирующая платформа **2** на основе пьезоподвижек фирмы Physik Instrumente (модель М-663) с шагом сканирования 0,1 мкм в диапазоне 20 мм по трем осям. Субволновой зонд **3** закреплен на стержне магнитострикционного генератора колебаний **5**. Необходимость введения генератора обусловлена малой величиной радиометрической мощности

рассеянного с зонда терагерцового излучения на фоне основной мощности. Также в состав сканирующей системы входит держатель для проецирующей оптики **6**, позволяющей снимать сигналы с острия зонда. Для калибровки системы в схему введен датчик касания **7**.

В настоящее время разрабатывается специализированная система синхронного детектирования рассеянного зондом излучения, включающая сверхпроводящий болометр на горячих электронах и электронную схему накопления сигнала. Проведены испытания всех элементов ближнепольного микроскопа, показавшие их работоспособность. Начаты эксперименты по регистрации рассеянного зондом микроскопа терагерцового излучения Новосибирского лазера на свободных электронах.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

В главе 3 описана разработанная методика проектирования рефракционно-дифракционных и гиперхроматических объективов, являющихся основными элементами волоконных конфокальных датчиков на основе метода хроматического кодирования и позволяющих фокусировать белый свет в хроматические отрезки различной длины. Сформулированы общие требования к разработке оптических схем таких объективов, на основе которых проводится их расчет для различных объектов. Представлен способ расчета фокусного расстояния ДОЭ для получения хроматического отрезка заданной длины при использовании микрообъективов с увеличениями 10, 20 и 40 \times . Установлено, что для снижения нелинейности фокусировки белого света в хроматические составляющие менее 1 % необходимо, как минимум, три марки оптического стекла.

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.

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 из центральной части объектива. Путем моделирования в ПО Zemax Optical Studio установлены аналитические зависимости спектрального распределения выходного сигнала при разных диаметрах аподизирующих масок. В ходе экспериментальных исследований установлено, 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. При этом при отсутствии аподизирующей маски в центральной части ГХО среднеквадратичное отклонение составляет 0,9 мкм в линейном измерительном диапазоне 225 мкм. При введении аподизирующей маски диаметром $0,4D$ СКО уменьшается до 0,2 мкм при сокращении линейного диапазона до 120 мкм.

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.

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.

ГЛАВА 4 ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО СИНТЕЗА МИКРО- И НАНОСТРУКТУР НА ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА ШАКА-ГАРТМАНА

В Главе 4 предложен и экспериментально апробирован метод на основе датчика волнового фронта Шака-Гартмана для контроля положения оптически прозрачных сред с целью определения средней скорости абляции при облучении их поверхности импульсами пикосекундной длительности. Представлены экспериментальные результаты по микро- и наноструктурированию оптического кварцевого стекла, пленок MgF_2 и кремния.

4.1 Микроструктурирование оптически прозрачных сред с помощью лазерной абляции с использованием ультракоротких импульсов пикосекундной длительности

Одна из задач выполненного исследования состояла в разработке метода высокоточного контролируемого воздействия лазерного излучения на обрабатываемый материал и создание на его основе экспериментального стенда для отработки технологии микро- и наноструктурирования поверхности оптически прозрачных сред импульсами пикосекундного ультрафиолетового лазера методом лазерной абляции (ЛА), а также изучение профиля кратеров испарения, определение оптимальной плотности мощности, при которой формируются кратеры с резкими краями без трещин и следов плавления, и средней линейной скорости абляции при облучении поверхности одиночным импульсом.

В случае формирования микроструктур на поверхности оптически прозрачных сред повышаются требования к системам фокусировки излучения. Оптически прозрачная среда обладает большим коэффициентом пропускания для

лазерного излучения, а плотность мощности, при которой происходит абляция (испарение) материала, имеет пороговый характер. Поэтому необходимо оперативное управление технологической операцией, при которой фокальная плоскость рабочего микрообъектива должна быть точно совмещена с поверхностью заготовки. Даже малая расфокусировка пятна может привести либо к формированию структур низкого качества из-за плавления вещества, либо к формированию структур в объеме материала.

В работе в качестве материала для микро- и наноструктурирования использовалось кварцевое стекло – один из наиболее широко используемых и распространенных материалов [80] в оптическом приборостроении. Оно обладает уникальными свойствами: прозрачностью в видимом диапазоне спектра, достаточной прочностью, стойкостью против воздействия окружающей среды и многих агрессивных сред, гибкой технологичностью, позволяющей относительно простыми средствами изготавливать изделия самой различной формы и назначения. Поэтому стекло выпускается в крупных промышленных масштабах и его изготовлению, обработке и применению уделяется огромное внимание. Кварцевое стекло используется также для создания прецизионных многоуровневых дифракционных и микрооптических элементов, применяемых в высокоточных приборах и системах.

С использованием энергетического подхода и согласно данным о форме кратеров, параметрах теплоемкости и параметров лазерного пучка в зоне воздействия была оценена пороговая плотность мощности для кварцевого стекла марки КУ-1 (ГОСТ 15130–86), которая составила $W' = 0,3 \times 10^{12}$ Вт/см². При повышении W' увеличивается глубина кратера испарения. Однако, как показано в работе [81], внутри достаточно глубоких кратеров происходит лазерный пробой воздуха, который инициируется находящимися там аблированными частицами субмикронного размера и, вследствие этого, характеризуется низким порогом возникновения. В мелких кратерах (аспектное отношение $h / \omega < 1$) экранировка при пробое обычно не наблюдается, что может объясняться эффективным удалением частиц за счет конвективных потоков воздуха. Расчет пороговой

плотности мощности и наличие ограничений по мощности, связанных с возможным пробоем воздуха, позволяют сформировать требования для проведения теста мощности в ходе экспериментальных исследований.

4.2 Способ контроля качества фокусировки лазерного пучка с помощью анализатора волнового фронта Шака-Гартмана

Для разработки технологии микро- и наноструктурирования поверхности кварцевого оптического стекла методом ЛА пикосекундными ультрафиолетовыми лазерными импульсами был спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд, представленный на рисунке 4.1. В нем используется высокотехнологичный лазерный комплекс на базе твердотельного лазера с диодной накачкой DUETTO-OEM V3.4 (Switzerland), который имеет следующие характеристики: средняя мощность 10–15 Вт, частота следования импульсов 50 кГц – 8 МГц, энергия импульсов до 200 мкДж, длина волны $\lambda = 355$ нм, длительность импульса 10 пс. В состав комплекса входит блок выделения одиночного импульса для экспериментального определения пороговой плотности мощности и средней скорости абляции.

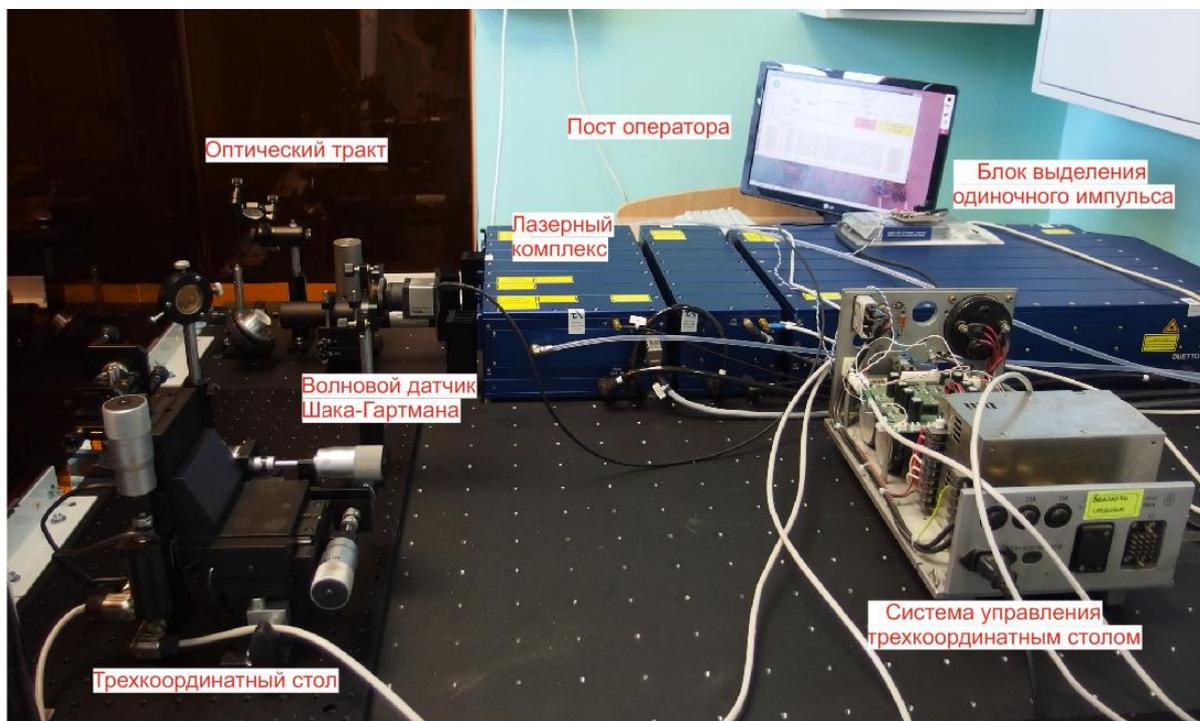


Рисунок 4.1 – Экспериментальный стенд для отработки технологии прямой записи профиля на поверхности кварцевого стекла с помощью абляции пикосекундными УФ лазерными импульсами

Для коллимирования и фокусировки излучения в записывающее пятно диаметром порядка 2 мкм (для микрообъектива с увеличением 20[×]) используется оптический тракт, все элементы которого изготовлены из кварца и обладают высокой устойчивостью к интенсивному лазерному излучению (порог разрушения 50–500 МВт/см²). Оптический тракт состоит из коллиматора, поворотного и полупрозрачного зеркал и микрообъектива. Кварцевая заготовка перемещается с помощью трехкоординатного столика Standa с шагом 0,2 мкм по осям *X*, *Y*, *Z*. Для определения плоскости наилучшей фокусировки лазерного пятна в схему введен волновой датчик Шака-Гартмана (ШГ) (Thorlabs, модель WFS150-7AR) [82], который состоит из матрицы микролинз и расположенной в их фокальной плоскости видеокамеры. Параметры линз и видеокамеры представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры датчика Шака-Гартмана Thorlabs WFS150-7AR

Микролинзы	
Материал подложки	Кварц
Диапазон длин волн, нм	400–900
Диаметр диафрагмы, мм	9
Форма линз	Двояковыпуклая
Диаметр линз, мкм	146
Отражательная способность, %	< 1
Номинальное фокусное расстояние, мм	6,7
Эффективное фокусное расстояние, мм	5,2
Размер массива, мм	10×10×1.2
Камера	
Тип датчика	ПЗС
Разрешение, пикселей	Макс. 1280×1024
Размер апертуры, мм	5,95×4,76
Размер пикселя, мкм	4,65×4,65
Диапазон выдержек	79 мкс – 65 мс
Максимальная частота кадров, Гц	15
Оцифровка изображения	8 бит

Линзы датчика ШГ разделяют исследуемый волновой фронт на субапертуры (см. рисунок 4.2), формируя в фокальной плоскости совокупность фокальных пятен. Положение каждого из пятен зависит от локального наклона волнового фронта пучка, пришедшего на вход датчика. Измеряя поперечные смещения фокальных пятен, можно вычислить средние углы наклонов волнового фронта в пределах каждой из субапертур. По этим величинам вычисляется профиль волнового фронта на всей апертуре датчика.

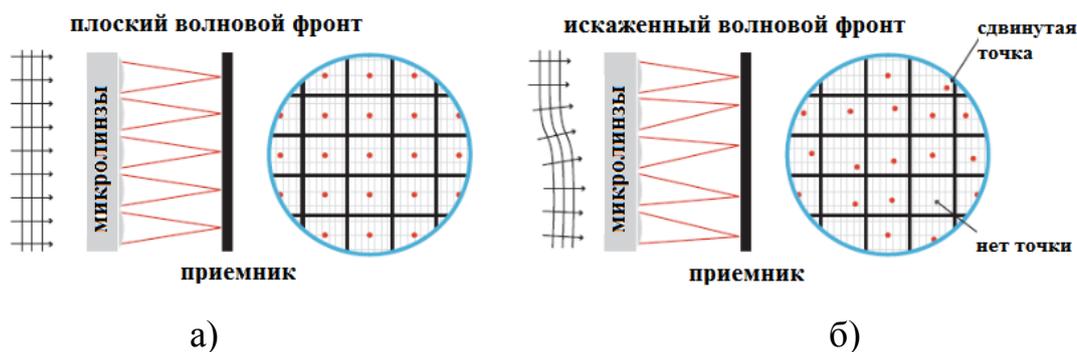


Рисунок 4.2 – Внутренняя структура датчика Шака-Гартмана для случаев:
а) идеальный волновой фронт; б) волновой фронт с aberrациями

Датчик ШГ, входящий в состав лазерного стенда, позволяет контролировать расстояние между фокусирующим микрообъективом и заготовкой из кварца, что наглядно иллюстрирует рисунок 4.3. Коллимированный световой поток от лазера ($\lambda = 355$ нм) проходит через полупрозрачное зеркало и фокусируется микрообъективом с увеличением 20^{\times} и числовой апертурой $NA = 0,4$ на поверхность заготовки из кварца (плоскость A). Отраженная от поверхности заготовки часть излучения лазера попадает назад в микрообъектив, проходит через полупрозрачное зеркало и попадает на чувствительную поверхность датчика ШГ. Если поверхность заготовки кварца точно совпадает с фокальной плоскостью микрообъектива (позиция A), то отраженные лучи будут параллельными на выходе микрообъектива (лучи 1–1). В этом случае радиус кривизны R волнового фронта равен бесконечности. Далее возможны два варианта: в первом случае поверхность смещена на расстояние $-\Delta z$ от фокуса (позиция A'), во втором случае – на расстояние $+\Delta z$ (позиция A''). В зависимости от знака смещения отраженные лучи 2–2 и 3–3 будут либо сходящимися, либо расходящимися, а радиусы кривизны волнового фронта будут менять знак и величину.

$$R = \frac{D_{\text{ШГ}}^2 + h^2}{2h}, \quad (4.1)$$

где $D_{\text{ШГ}}$ – диаметр апертуры датчика ШГ.

Из уравнения 4.1 нетрудно получить следующую формулу для стрелки прогиба h :

$$h = W = R - \sqrt{R^2 - \frac{D_{\text{ШГ}}^2}{4}}. \quad (4.2)$$

Так как согласно рисунку 4.3 задний рабочий отрезок микрообъектива $a' = R$, то из формулы линзы [61] передний рабочий отрезок будет равен:

$$a = a_1 + a_2 = \frac{fR}{R-f}, \quad (4.3)$$

где f – фокусное расстояние микрообъектива.

Подставив (4.1) в (4.3) и взяв производную по h , получим следующее выражение для величины ошибки Δa :

$$\Delta a = \left(\frac{1}{2} - \frac{D^2}{8h^2} \right) \left(\frac{f^2}{(R-f)^2} \right) \Delta h. \quad (4.3)$$

Для датчика ШГ, используемого в экспериментах, согласно формуле (4.3) $\Delta a = 0,1$ мкм [83].

На рисунке 4.5 изображен измеренный датчиком волновой фронт отраженного от поверхности заготовки лазерного луча с длиной волны $\lambda = 355$ нм.

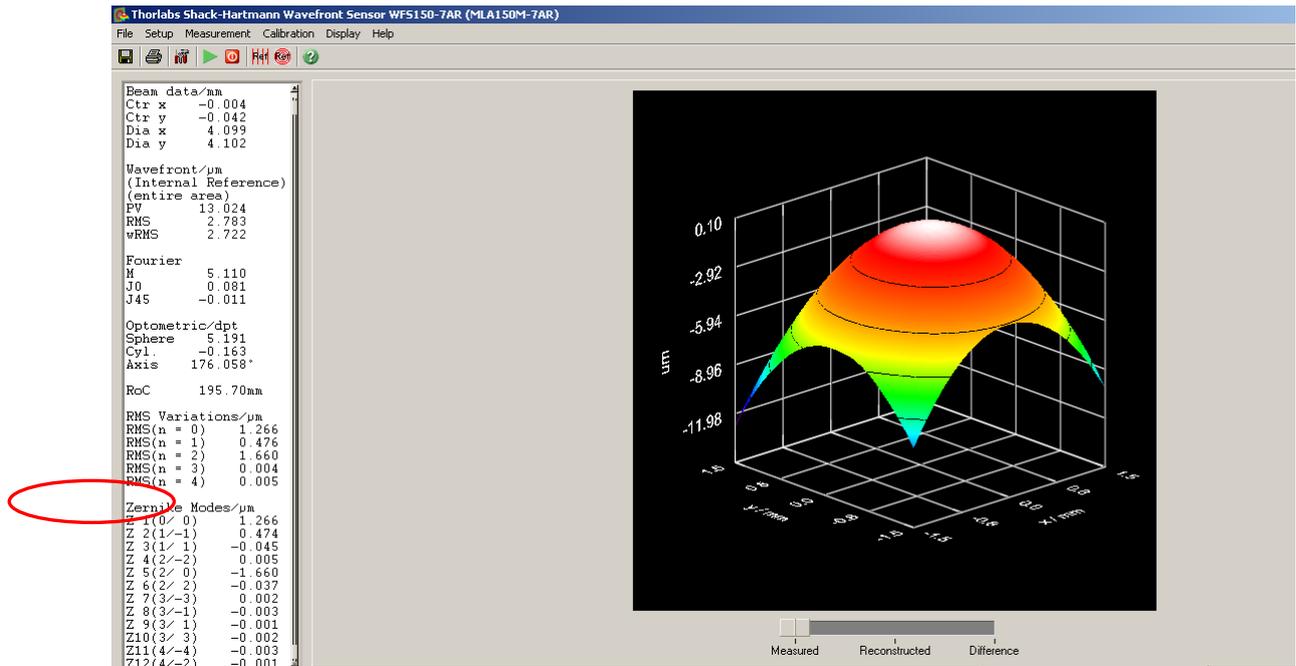
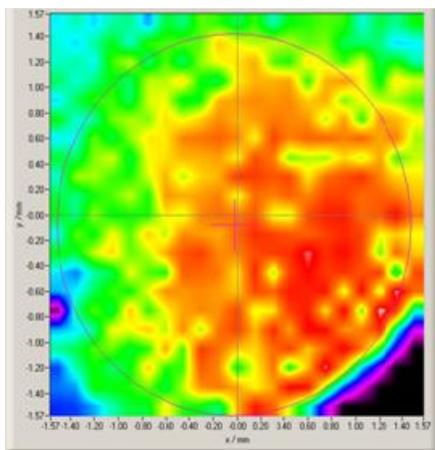


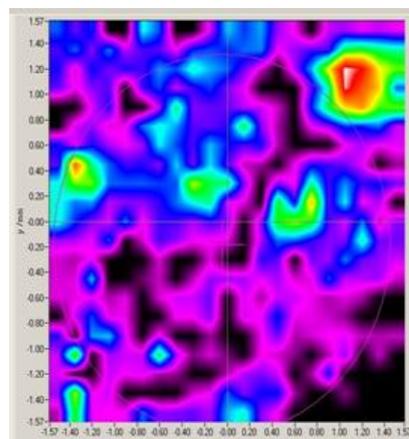
Рисунок 4.5 – Пример измерения параметров волнового фронта лазерного пучка с длиной волны $\lambda = 355$ нм

В случае если стеклянная заготовка находится в фокусе микрообъектива, то радиус кривизны стремится к бесконечности (~ 50 м). Если заготовка выходит из фокуса во время абляции (или во время настройки), то кривизна фронта отлична от нуля.

Существенно, что процесс абляции можно контролировать визуально по искажениям волнового фронта отраженного излучения. В случае, когда поверхность находится в фокусе, то пятно на датчике ШГ до начала абляции имеет вид, приведенный на рисунке 4.6, а). После абляции пятно искажается в связи с развалом зондирующего (лазерного) пучка (см. рисунок 4.6, б).



а)



б)

Рисунок 4.6 – Изображение отраженного лазерного пятна на датчике ШГ в случаях, когда поверхность заготовки в фокусе (а) и когда на поверхности произошла абляция с образованием кратера испарения (б)

4.3 Экспериментальные исследования прямого контролируемого профилирования оптических прозрачных сред с использованием датчика Шака-Гартмана

Для исследования механизмов ЛА использовалось кварцевое оптическое стекло марки КУ-1 (ГОСТ 15130–86). Необходимо было определить «качество», воспроизводимость получаемых кратеров и их топологические параметры (глубину, объем и форму).

Была проведена запись микроструктур в виде квадрата, внутри которого располагалась матрица кратеров, полученных при разных уровнях плотности мощности. На рисунке 4.7 в качестве примера приведена структура в кварце, полученная при плотности мощности лазерного излучения $3,2 \times 10^{12}$ Вт/см². Форма и глубина кратеров, оставленных после ЛА на поверхности стеклянных образцов, исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NtMdt Integra Prima HD. Геометрические параметры кратеров (диаметр входного отверстия и глубина) измерялись в программе Image Analysis.

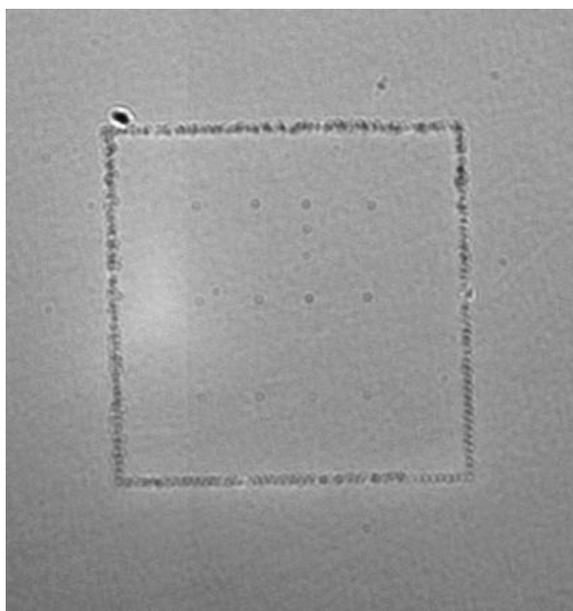
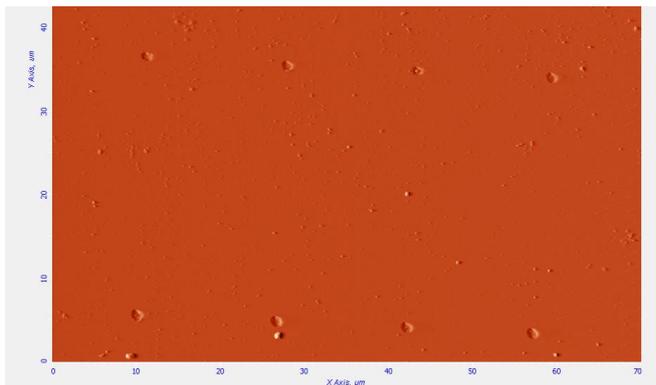
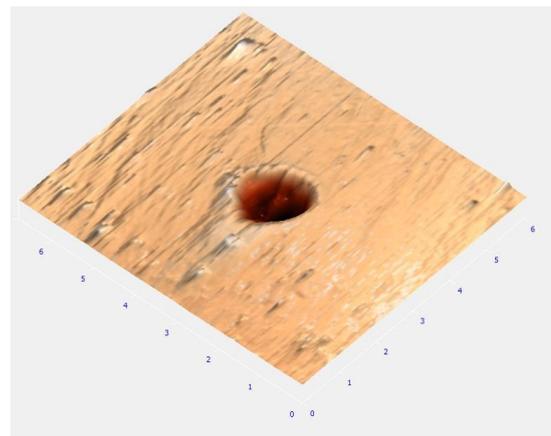


Рисунок 4.7 – Изображения микроструктуры в виде квадрата размером 60×60 мкм, полученные с помощью ЛА в кварцевом оптическом стекле при плотности мощности $3,2 \times 10^{12}$ Вт/см²

Для записи контура квадрата, который необходим для упрощенного поиска нано- и микроструктур на поверхности стекла, использовался многоимпульсный режим обработки. Кратеры, сосредоточенные внутри, получены в результате одноимпульсной обработки. На рисунке 4.8, *а* приведено трехмерное изображение матрицы кратеров, полученное с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ-изображение), а на рисунке 4.8, *б* – увеличенное изображение одиночного кратера. Из этих рисунков видно, что параметры лазера подобраны таким способом, что все кратеры имеют одну и ту же форму, края кратеров не оплавлены, отсутствует разбрызгивание материала и осаждение продуктов испарения. Шероховатость дна кратера сопоставима с шероховатостью немодифицированной поверхности кварца. Качество краев кратеров, отсутствие трещин, каемок плавления и выбросов расплавленного материала – все это являлось критерием для выбора оптимальной плотности мощности.



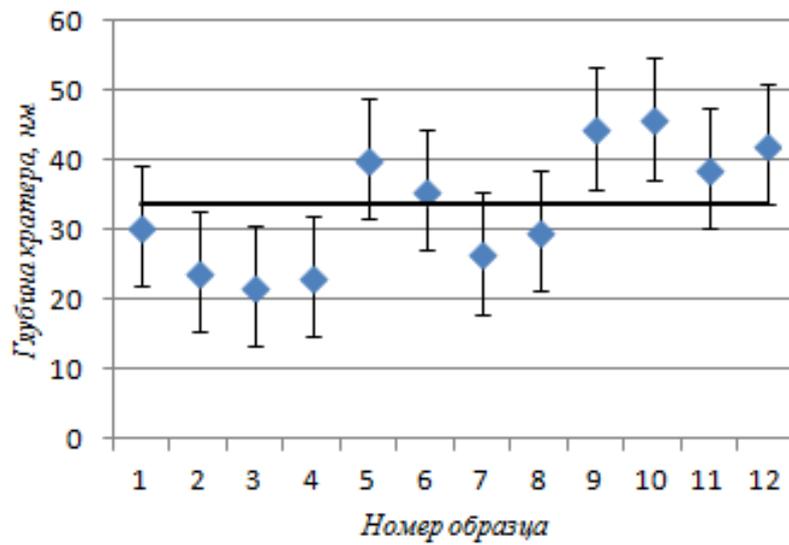
а)



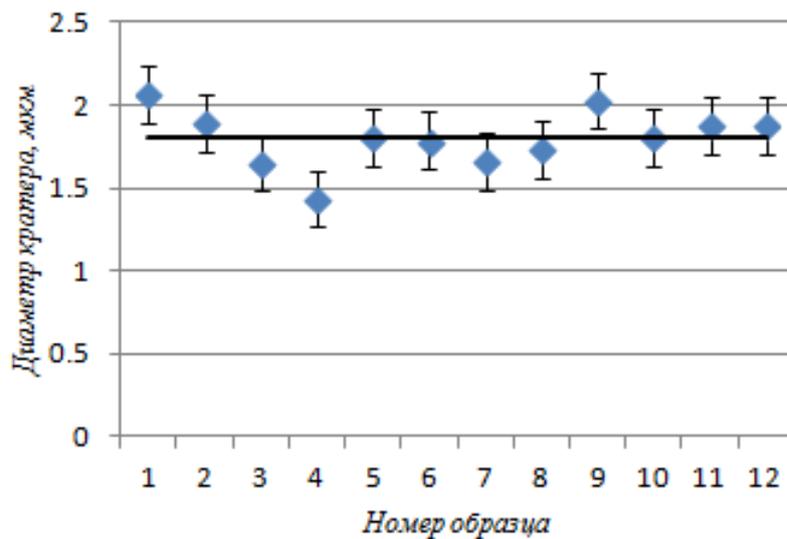
б)

Рисунок 4.8 – АСМ-изображения кратеров в кварцевом стекле, полученных с помощью ЛА при плотности мощности $3,2 \times 10^{12}$ Вт/см²: а) матрица кратеров; б) одиночный кратер. Размеры кратеров: диаметр 1,8 мкм, высота 34 нм

На рисунке 4.9 приведены статистические данные по диаметру и глубине кратеров, полученных при плотности мощности $3,2 \times 10^{12}$ Вт/см². Глубина кратеров составила $34 \pm 6,8$ нм, диаметр – $1,8 \pm 0,17$ мкм. Ошибка записи составляет 9,4 % по диаметру и 17 % – по глубине [83]. Разброс значений по глубине связан с ошибкой позиционирования и может быть уменьшен за счет введения в схему системы автоматической фокусировки с обратной связью.



а)

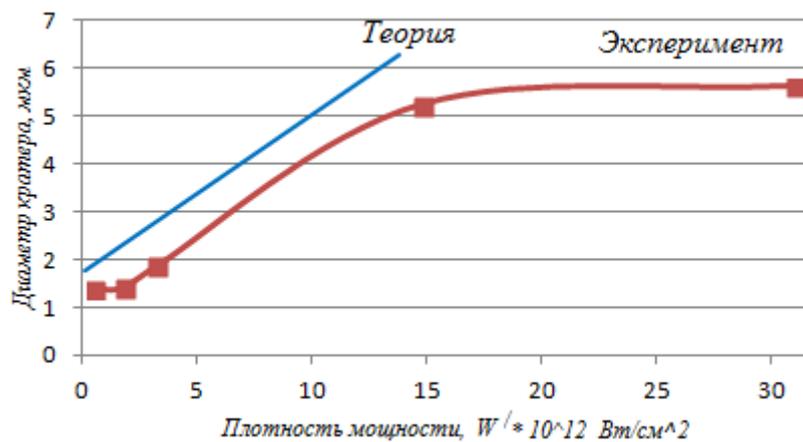


б)

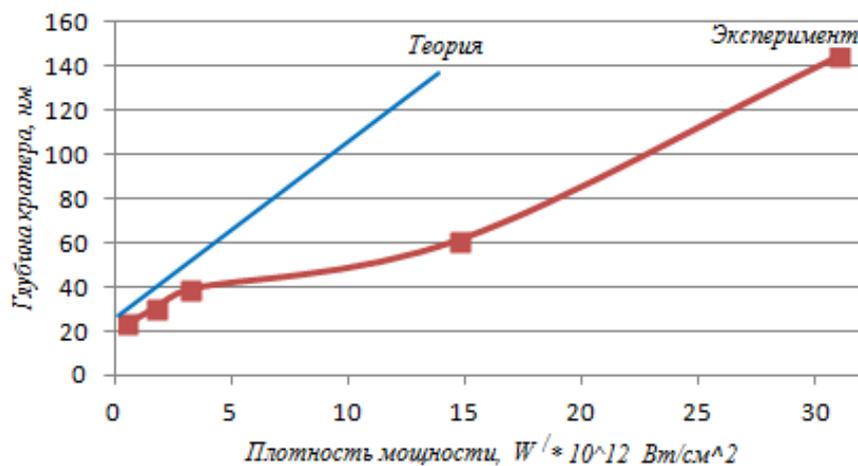
Рисунок 4.9 – Разброс значений глубины (а) и диаметров (б) кратеров на поверхности кварца, полученных при облучении лазерным одиночным импульсом пикосекундной длительности

В ходе исследований на экспериментальной установке с использованием датчика Шака-Гартмана и высокотехнологичного лазерного комплекса получены систематические экспериментальные данные и сформирован электронный атлас 3D-изображений кратеров с хорошим качеством края при следующих плотностях мощности: $0,57 \times 10^{12}$ Вт/см², $1,8 \times 10^{12}$ Вт/см², $3,2 \times 10^{12}$ Вт/см², 15×10^{12} Вт/см², 31×10^{12} Вт/см². Зависимость глубин и диаметров кратера от пороговой плотности

мощности приведена на рисунке 4.10, а и б соответственно. Проведено сравнение с расчетными данными, которые нуждаются в корректировке в связи с нелинейным характером зависимости параметров кратера от пороговой плотности мощности W .



а)



б)

Рисунок 4.10 – Зависимость глубины (а) и диаметров (б) кратеров, полученных в кварцевом стекле методом лазерной абляции, от плотности мощности лазерного излучения. Синяя линия – теоретическая зависимость, красная – экспериментальная

Из сравнения экспериментальных и расчетных данных можно сделать вывод о том, что для реализации технологии микро- и наноструктурирования поверхности кварцевого оптического стекла с целью получения необходимого

количества уровней квантования и достижения плавно меняющейся глубины крайне важно проведение предварительных тестовых записей с вариацией плотности мощности и подробным изучением трехмерных изображений полученных структур – в нашем случае кратеров.

Измерение геометрических параметров кратеров позволяет определить экспериментальным путем среднюю скорость абляции (таблица 7), диапазон которой составил от 23 ± 4 нм/импульс до 144 ± 18 нм/импульс. Это важный параметр, который позволит управлять глубиной микро- и наноструктур [83].

Таблица 7 – Средняя скорость абляции кварцевого стекла

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

4.3.1 Формирование цилиндрических отверстий в кварцевом стекле лазерным пучком с особой формой распределения интенсивности, сформированных средствами дифракционной оптики

При получении отверстий в стекле и других материалах с помощью сфокусированного лазерного пучка гауссово распределение интенсивности приводит к сосуществованию процессов плавления и испарения с преобладанием испарения в центре и значительной зоной расплава вблизи стенок отверстия. Дальнейшее повышение средней мощности излучения и увеличение энергии в импульсе для смещения процесса в сторону испарения приводят к менее стабильному качеству, особенно для глубоких отверстий [84]. Формируя равномерное распределение интенсивности по всей площади сфокусированного пучка, возможно создание микроканалов в микрофлюидике необходимого

качества. Например, для сохранения ламинарности потоков необходимы небольшая шероховатость поверхности и однородность канала на всем его протяжении [85]. Поэтому актуальной является разработка технологии гомогенизации гауссова пучка для современных технологических задач высокоскоростной обработки материалов.

Для формирования равномерного распределения интенсивности по всей площади сфокусированного пучка можно использовать объектив Focal- π Shape (AdlOptica, Germany) [86]. Однако данный объектив имеет высокую ценовую категорию. Поэтому было предложено рассчитать оптическую систему в ПО Zemax (рисунок 4.11), в состав которой входят фазовая маска и фокусирующий микрообъектив (Thorlabs, 20^x).

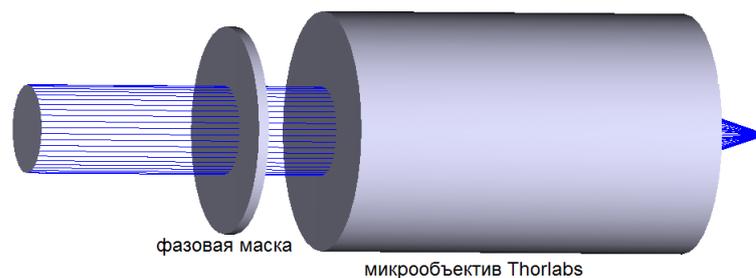


Рисунок 4.11 – Оптическая система, состоящая из фазовой маски и микрообъектива

Фазовая маска представляет собой подложку из кварцевого оптического стекла марки КУ-1 (ГОСТ 15130–86), на которой вытравлена круговая ступенька высотой 374 нм.

При отношении радиуса круговой ступеньки R_1 к световому диаметру R_2 , равному 0,8, в фокальной плоскости микрообъектива наблюдается равномерное распределение интенсивности. На рисунке 4.12 показано распределение интенсивности в фокусе микрообъектива (рисунок 4.12, а) при освещении гауссовой волной и для случая, если в его входном зрачке находится фазовая маска (рисунок 4.12, б).

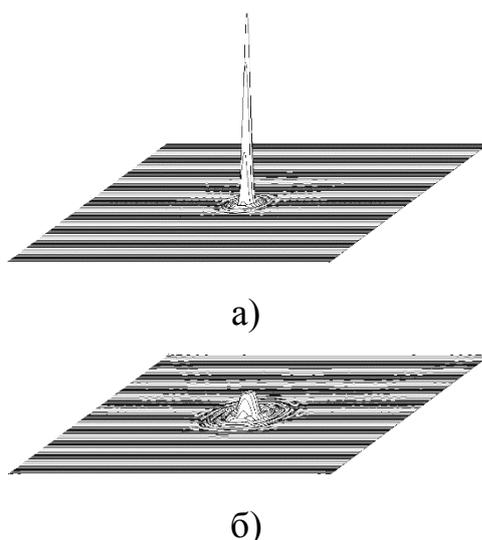


Рисунок 4.12 – Распределение интенсивности лазерного излучения в фокусе микробъектива без маски (а) и при ее наличии (б)

На основе полученной фазовой маски был спроектирован и создан экспериментальный стенд (рисунок 4.13) для разработки технологии прецизионной обработки оптических прозрачных материалов с помощью лазерной абляции пикосекундными УФ-импульсами. Излучение твердотельного лазера с диодной накачкой DUETTO-OEM V3.4 (Time-Bandwidth Products, Switzerland) **1** расширяется с помощью коллиматора **2** и проходит через систему зеркал **3**, **4**. Далее он расщепляется светоделительной пластиной **5**. Часть излучения проходит через фазовую маску **6** и фокусируется с помощью микробъектива **7** ($20\times$, Thorlabs, Germany) на поверхность заготовки, которая находится в специальном держателе **8**. Держатель с заготовкой перемещается с помощью трехкоординатного столика **9** (Phytron, Germany). Положение фокальной плоскости контролировалось с помощью датчика Шака-Гартмана **10** (Thorlabs, Germany).

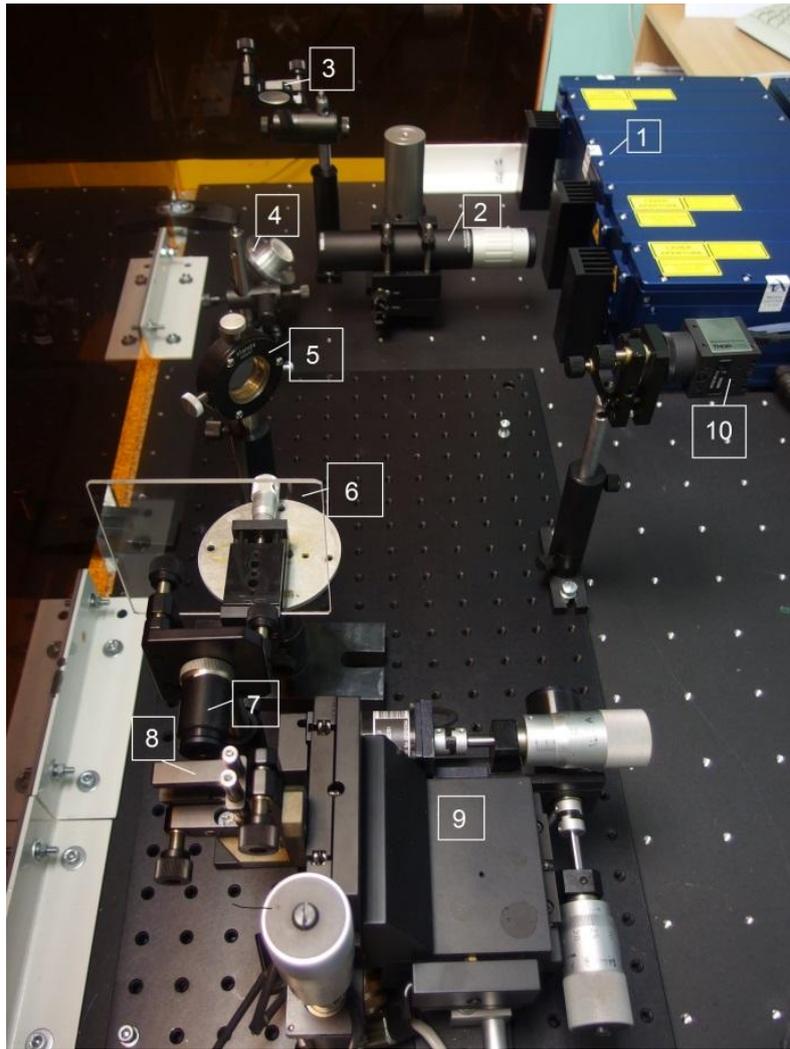


Рисунок 4.13 – Экспериментальный стенд для обработки технологии получения цилиндрических отверстий в оптических прозрачных материалах

Эксперименты по формированию структур в кварцевом стекле проводились с использованием одного или нескольких импульсов. Введение фазовой маски **6** позволило получить при многоимпульсной обработке отверстия в кварцевом стекле, по форме близкие к цилиндрической. На рисунке 4.14, *а* представлена профилограмма кратера при облучении поверхности кварцевого стекла микрообъективом без фазовой маски, а на рисунке 4.14, *б* – при многоимпульсной обработке с использованием фазовой маски. Профилограммы кратеров были получены в программе Image Analysis по изображениям кратеров на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Nt-Mdt Integra Prima HD.

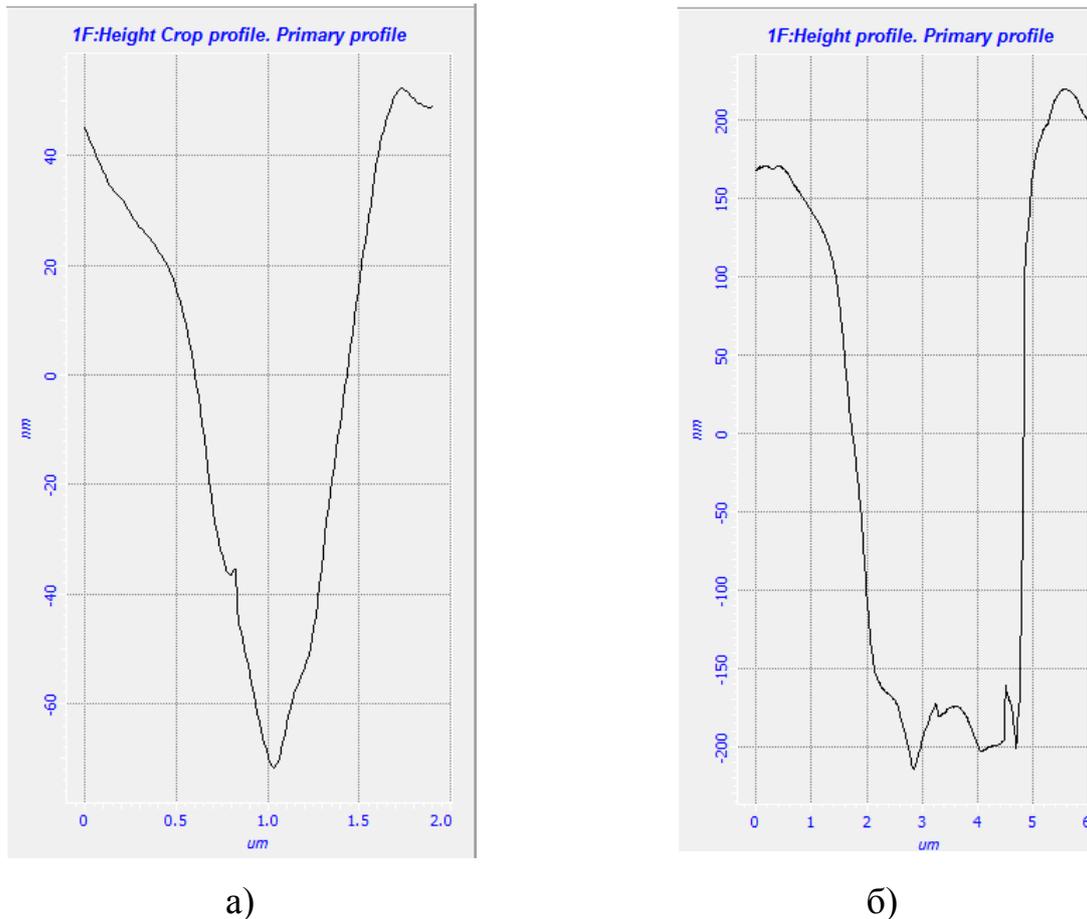


Рисунок 4.14 – Профилограммы АСМ-изображений, полученных при сканировании кратеров: а) для случая облучения поверхности одиночным пикосекундным УФ-импульсом без использования фазовой маски; б) для случая облучения поверхности 10 пикосекундными УФ-импульсами с использованием фазовой маски (шероховатость дна кратера 50 нм). Плотность мощности: $3,2 \times 10^{12}$ Вт/см²

Одним из способов формирования отверстий с плоским дном является испарение диэлектрических покрытий на полированном кварцевом стекле. Расчетная пороговая плотность мощности для кварцевого стекла на несколько порядков выше таковой для ряда оптических прозрачных диэлектриков. Поэтому возможно испарение только диэлектрического покрытия без существенного теплового влияния на кварцевое стекло. Варьируя толщины диэлектрических покрытий и используя несколько слоев, можно разработать технологию формирования сверхточных дифракционных структур с повышенной дифракционной эффективностью, а также расходных элементов биочипов для целей микрофлюидики [87].

В ходе экспериментальных исследований на поверхность полированного кварцевого стекла был напылен слой диэлектрика MgF_2 толщиной 0,5 мкм, который удалялся при плотности мощности $3 \times 10^9 \text{ Вт/см}^2$. В результате были сформированы структуры с плоским дном. Профилограмма отверстия, полученная на АСМ-микроскопе, представлена на рисунке 4.15.

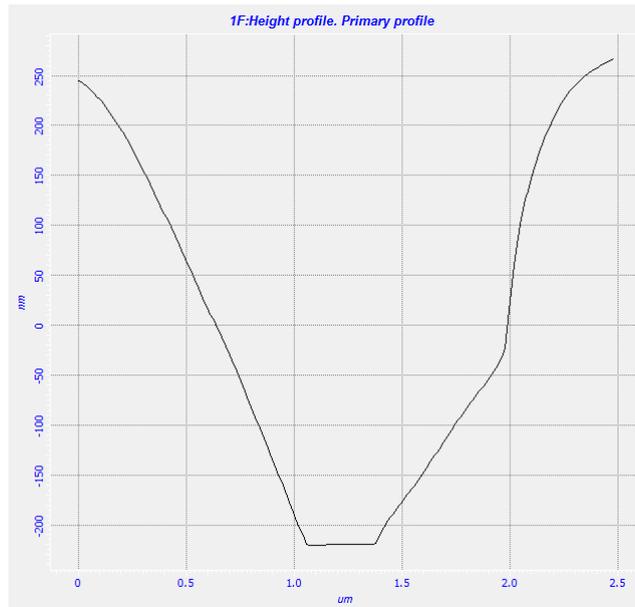


Рисунок 4.15 – Профилограмма отверстия в двухслойной структуре MgF_2 – кварцевое стекло. Шероховатость дна отверстия 5 нм

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены подложки из кварцевого оптического стекла марки КУ-1 (ГОСТ 15130–86). На подложки был нанесен слой пленки MgF_2 толщиной 0,25 мкм, который необходимо было испарить. На рисунке 4.16 показано АСМ-изображение кратера при облучении пикосекундными УФ-импульсами с плотностью мощности $3 \times 10^9 \text{ Вт/см}^2$, количество импульсов – 10.

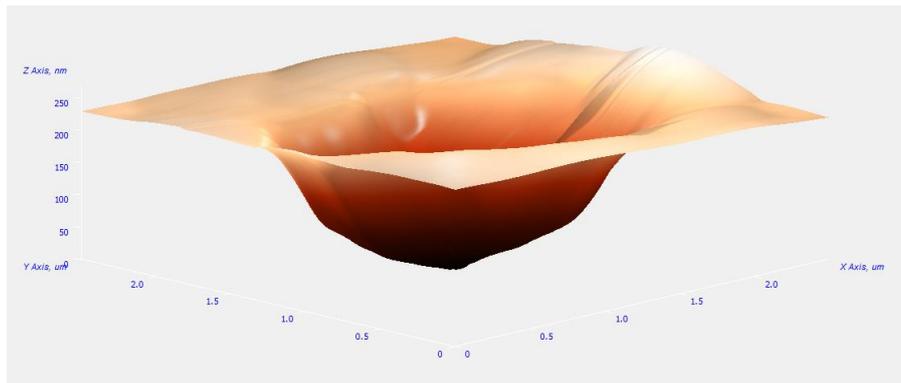


Рисунок 4.16 – АСМ-изображение кратера на поверхности двухслойной структуры, состоящей из кварцевого оптического стекла марки КУ-1 и пленки MgF_2

Также при многоимпульсном режиме обработки были получены серии «глубоких» цилиндрических отверстий в кварцевом стекле при плотности мощности $3,2 \times 10^{12}$ Вт/см². На рисунке 4.17 представлено изображение цилиндрического отверстия глубиной 33 мкм, полученное на интерференционном микроскопе-нанопрофилометре МНП-32, при этом шероховатость дна составляет 5 мкм.

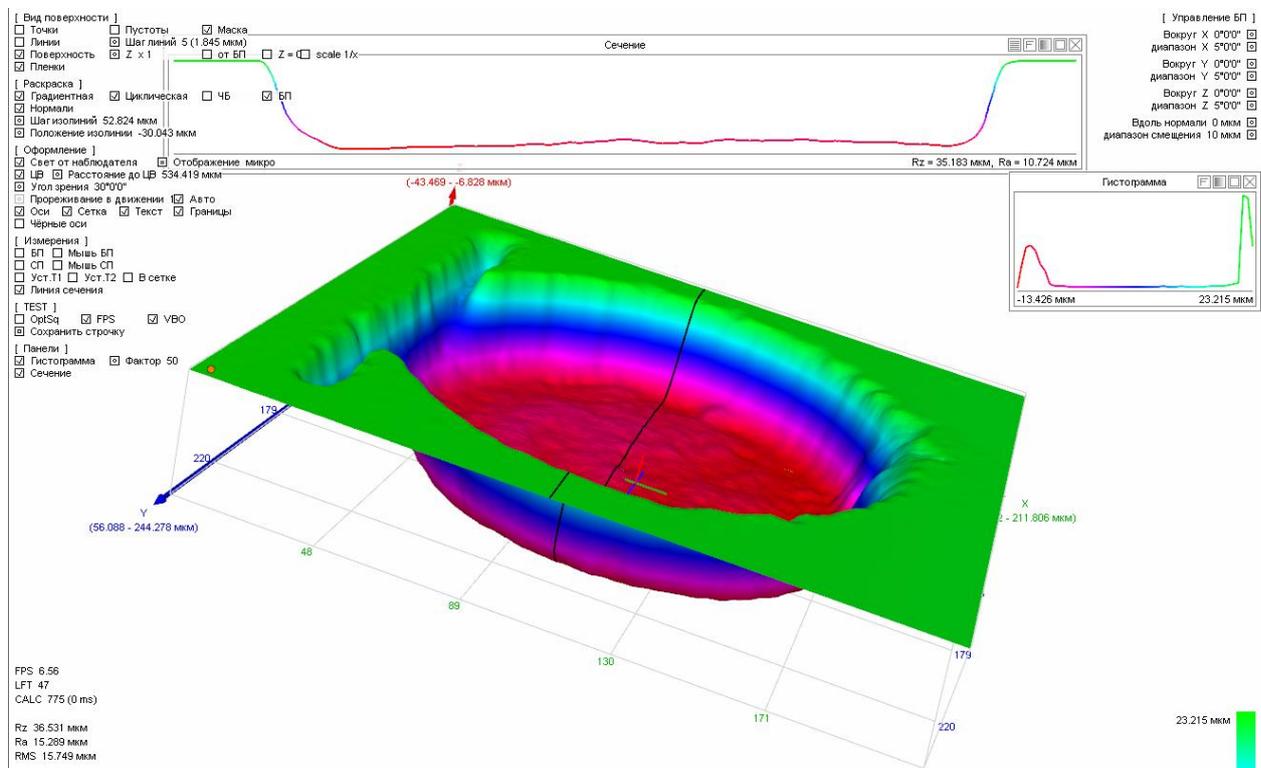


Рисунок 4.17 – Изображение цилиндрического отверстия в кварцевом оптическом стекле марки КУ-1

С помощью атомно-силового микроскопа Nt–Mdt Integra Prima HD и микроскопа-нанопрофилометра МНП-32 оценивались оплавления краев кратеров, степень разбрызгивания и растрескивания материала. Из рисунка 4.17 видно, что профиль отверстий близок к цилиндрическому, а вдоль кромки отверстий нет каемок плавления. Существующие сколы можно предотвратить записью структур в непрерывном режиме, а также путем оптимизации коэффициентов перекрытия импульсов.

Для демонстрации трехмерной микрообработки оптических прозрачных материалов использовалась тестовая 3D модель пирамиды, состоящая из пяти ступенек, глубина которых задается количеством импульсов. Размер одной пирамиды – 150×150 мкм, размер ступеньки – 30 мкм. Удаление материала осуществлялось лазерными УФ-импульсами пикосекундной длительности послойно.

Многоуровневые тест-объекты сформированы в кремниевых (рисунок 4.18) подложках и демонстрируют возможности трехмерной микрообработки. Как видно, микроструктуры получились хорошего качества.

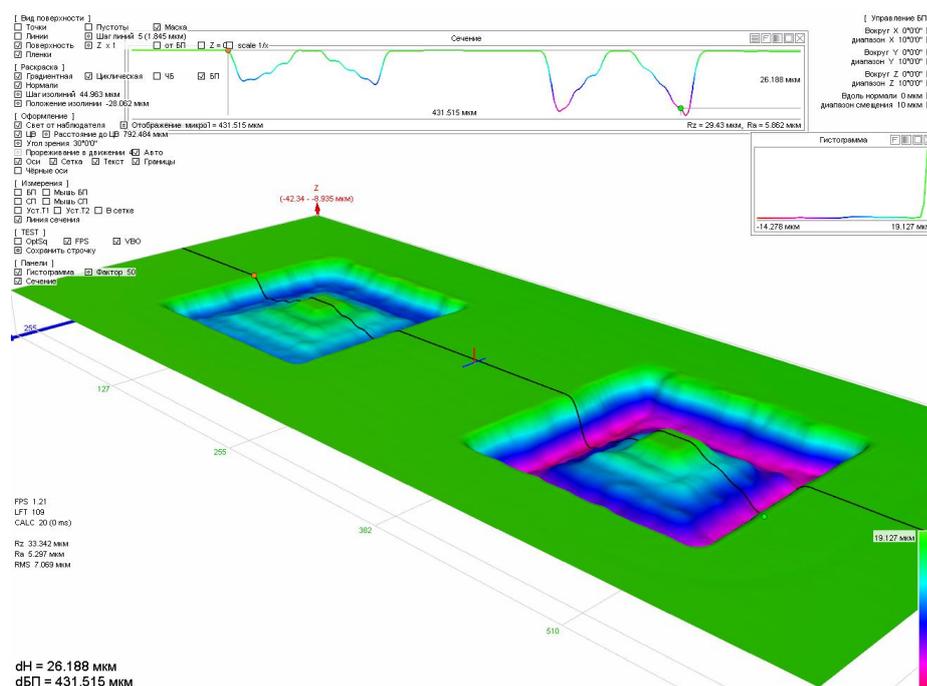


Рисунок 4.18 – Изображения многоуровневых структур, полученные в кремнии методом прямого микропрофилирования с помощью «холодной» абляции импульсами пикосекундной длительности

Таким образом, предложенные технические решения позволили изучить результат взаимодействия мощных пикосекундных импульсов с поверхностью кварцевого стекла и кремния. Результаты исследований являются основой для

создания технологии синтеза широкого класса прецизионных многоуровневых дифракционных и микро-оптических элементов путём прямого структурирования поверхности оптически прозрачных материалов импульсами сверхкороткой длительности.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

В главе 4 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. 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 пучка. 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. Установлены параметры плотности мощности и глубины кратеров испарения данных материалов.

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

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

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 и 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. Теоретически и экспериментально показано, что применение аподизирующих масок в составе гиперхроматического объектива дает возможность уменьшить ширину спектрального распределения выходного сигнала в три раза при падении его уровня в 2,5 раза.

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.

На стенде с помощью одиночных импульсов пикосекундной длительности синтезированы кратеры на поверхности кварцевого оптического стекла и кремния и проведено сканирование полученных структур на атомно-силовом микроскопе NtMdt Integra Prima HD. Сформирован электронный атлас 3D изображений кратеров. Данный атлас демонстрирует влияние параметров излучения лазера на качество и воспроизводимость характеристик микро- и наноструктур на поверхности кварца. 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.

Разработанный датчик автоматической фокусировки на основе ножа Фуко вошел в состав круговых лазерных записывающих систем для синтеза микроструктур высокой точности на плоских и криволинейных поверхностях. Такие системы эффективно используются для производства сверхвысокоточных широкоапертурных (до 250 мм) гибридных оптических элементов, шкал, лимбов, масок, цифровых голограмм. Ошибка восстановленного волнового фронта синтезированных элементов достигает уровня $\lambda/100$. Коммерческие версии КЛЗС нового поколения поставлены по контрактам в Харбинский институт технологий (КНР), Самарский государственный аэрокосмический университет, в АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (Россия, г. Екатеринбург), в АО «Новосибирский приборостроительный завод», что подтверждено актами внедрения.

Данные датчики могут использоваться как для построения систем автофокусировки излучения в лазерных технологических комплексах (датчик на основе ножа Фуко), так и для измерения профиля полученных структур (конфокальный датчик на основе хроматического кодирования), а также для сверхточного позиционирования оптически прозрачных сред (метод на основе анализатора волнового фронта Шака-Гартмана).

Направлением дальнейших исследований является разработка высокотехнологичного лазерного комплекса, позволяющего проводить запись нано- и микроструктур на трехмерных оптических поверхностях методом лазерной абляции сверхкороткими (пикосекундными) импульсами, а также контролировать профиль полученных структур с помощью встроенного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, д.т.н., профессору Юрию Васильевичу Чугую за большую поддержку на протяжении всей работы над диссертацией, за неоценимую помощь в обсуждении результатов и подготовке статей к печати. Кроме того, большая благодарность выражается заведующему лабораторией лазерных промышленных

технологий КТИ ИП СО РАН Александру Григорьевичу Верхогляду за поддержку молодых исследователей и поиск интересных и актуальных задач в области лазерных технологий. Хочется поблагодарить весь коллектив лаборатории лазерных промышленных технологий за постоянное содействие и доброжелательную рабочую атмосферу. Большой опыт был передан автору д.т.н. Виктором Павловичем Корольковым на стадиях проектирования, изготовления, настройки и сдачи в эксплуатацию круговых лазерных записывающих систем. Автор считает это бесценным вкладом в становление молодого специалиста и выражает свою огромную признательность.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей кандидатской диссертации применяют следующие сокращения.

КЛЗС – круговая лазерная записывающая система

КТИ НП – конструкторско-технологический институт научного приборостроения

ИАиЭ – институт автоматики и электрометрии

ИЯФ – институт ядерной физики

ФЦП – федеральные целевые программы

САФ – система автоматической фокусировки

ГХО – гиперхроматический объектив

ПИД-регулятор – пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор

ДАФ – датчик автоматической фокусировки

АФ – автофокусировка

ДОЭ – дифракционный оптический элемент

ЛСЭ – лазерная станция на свободных электронах

НПВО – нарушенное полное внутреннее отражение

ЛА – лазерная абляция

АСМ – атомно-силовой микроскоп

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирьянов, В. П. Лазерные генераторы изображений с круговым сканированием: новые возможности традиционных направлений / В. П. Кирьянов, А. В. Кирьянов, В. П. Корольков // Оптико-информационные измерительные и лазерные технологии и системы : юбилейный сб. избр. тр. КТИ НИ СО РАН / науч. ред. Ю. В. Чугуй. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2012. – С. 184–216. – ISBN 978-5-904683-00-9.
2. Микрофлюидные системы для химического анализа / под. ред. Ю. А. Золотова и В. Е. Курочкина. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 528 с.
3. Метод сфокусированного ионного пучка при формировании наноразмерных структур в микрофлюидных чипах / А. А. Евстапов, И. С. Мухин, И. В. Кухтевич, А. С. Букатин // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – № 20. – С. 32–40.
4. Миронов, В. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В. Миронов. – М. : Техносфера, 2005. – 144 с.
5. Kawata, S. Plasmonics for near field nano-imaging and superlensing / S. Kawata, Y. Inouye, P. Verma // Nature Photonics. – 2009. – Vol. 3. – P. 388–394.
6. Phillips, K. C. Ultrafast laser processing of materials : a review / K. C. Phillips, H. N. Gandhi, E. Mazur, S. K. Sundaram // Advances in Optics and Photonics. – 2015. – Vol. 7. – № 4. – P. 684–712.
7. Булгакова, Н. М. Лазерно-индуцированная модификация прозрачных кристаллов и стекол / Н. М. Булгакова, Р. Стоян, А. Розенфельд // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – № 11. – С. 966–985.
8. Модификация кварцевого стекла лазерными импульсами фемтосекундной длительности / В. В. Кононенко, В. П. Пашинин, М. С. Комленок, В. И. Конов // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33. – № 3. – С. 254–260.
9. Джексон, Г. Новейшие датчики / Джексон Г. – М. : Техносфера, 2008. – 397 с.

10. Лич, Р. Инженерные основы измерений нанометровой точности / Р. Лич. – Долгопрудный : Интеллект, 2012. – 400 с.
11. Клаассен, К. Б. Основы измерений. Датчики и электронные приборы / К. Б. Клаассен, Е. В. Воронов, А. Л. Ларин. – 4-е изд. – Долгопрудный : Интеллект, 2012. – 352 с.
12. Zeitner, U. D. Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems / U. D. Zeitner, P. Dannberg // *Proceedings of SPIE – Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication*. – 2001. – Vol. 4440. – P. 44–50.
13. Stone, T. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats / T. Stone and N. George // *Applied Optics*. – 1988. – Vol. 27. – Is. 14. – P. 2960–2971.
14. Высокоэффективные рельефно-фазовые дифракционные элементы на криволинейных поверхностях вращения / Г. И. Грейсх, Е. Г. Ежов, З. А. Сидякина, С. А. Степанов // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37. – № 1. – С. 45–50.
15. Моделирование трехмерного устройства нанофотоники для ввода излучения в планарный волновод / А. Г. Налимов, А. А. Ковалев, В. В. Котляр, В. А. Сойфер // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33. – № 1. – С. 4–9.
16. Shack, R. V. Production and use of a lenticular Hartmann screen / R. V. Shack, B. C. Platt // *Journal of the Optical Society of America*. – 1971. – Vol. 61. – P. 656–660.
17. Потанин, С. А. Датчик Шака-Гартмана для контроля качества оптики 2.5-м телескопа ГАИШ МГУ / С. А. Потанин // *Астрономический журнал*. – 2009. – Т. 86. – № 7. – С. 1–7.
18. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics / H. S. Ko, M. P. Stoykovich, J. Song, V. Malyarchuk, W. M. Choi, C.-J. Yu, J. B. Geddes 3rd, J. Xiao, S. Wang, Y. Huang, J. A. Rogers // *Nature*. – 2008. – Vol. 454 (7205). – P. 748–753.
19. Jeong, K.-H. Biologically inspired artificial compound eyes / K.-H. Jeong, J. Kim, L. P. Lee // *Science*. – 2006. – Vol. 312 (5773). – P. 557–561.

20. Dostovalov, A. V. Simultaneous formation of weakly and highly ordered laser-induced periodic surface structures on Ti film at femtosecond irradiation / A. V. Dostovalov, V. P. Korolkov, S. A. Babin // *Laser Physics Letters*. – 2015. – Vol. 12. – № 3. – 036101 (6 p.). – DOI : 10.1088/1612-2011/12/3/036101.

21. Вейко, В. П. Лазерное микроструктурирование поверхностей / В. П. Вейко, С. С. Дышловенко // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2001. – № 4. – С. 119–128.

22. High-speed and crack-free direct-writing of microchannels on glass by an IR femtosecond laser / E. Bulushev, V. Bessmeltsev, A. Dostovalov, N. Goloshevsky, A. Wolf // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2016. – № 79. – P. 39–47. – DOI : 10.1016/j.optlaseng.2015.11.004.

23. Single-shot ablation of sapphire by ultrashort laser pulses / M. Christensen, J. Byskov, B. Christensen, P. Balling // *Applied Physics*. – 2010. – № 101 (2). – P. 279–282. – DOI : 10.1007/s00339-010-5817-7.

24. Dausinger, F. Micro-machining with ultrashort laser pulses: From basic understanding to technical applications / F. Dausinger, H. Hugel, V. I. Konov // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. – 2003. – Vol. 5147. – P. 106–115. – DOI : 10.1117/12.537496.

25. Poleshchuk, A. G. Diffractive optical elements: fabrication and application / A. G. Poleshchuk, V. P. Korolkov, R. K. Nasyrov // *Proceedings of SPIE – 7th International Symposium on advanced optical manufacturing and testing technologies: design, manufacturing, and testing of micro- and nano-optical devices and systems*. – 2014. – Vol. 9283. – P. 928302. – DOI: 10.1117/12.2073301.

26. Бессмельцев, В. П. Оптимизация режимов лазерной микрообработки (обзор) / В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев // *Автоматрия*. – 2014. – Т. 50. – № 6. – С. 3–21.

27. Завестовская, И. Н. Анализ нелинейных механизмов поглощения света при облучении диэлектриков и широкозонных полупроводников лазерными импульсами фемтосекундной длительности / И. Н. Завестовская, Н. А. Менькова, О. Н. Крохин // *Научная сессия МИФИ – 2008. Физика плазмы и управляемый*

термоядерный синтез. Лазерная физика. Фотоника и информационная оптика. Физика конденсированного состояния вещества. – 2008. – Т. 2. – С. 121–123.

28. Molian, P. Picosecond Pulsed Laser Ablation and Micromachining of 4H–SiC Wafers / P. Molian, B. Pecholt, S. Gupta // *Applied Surface Science*. – 2009. – Vol. 255 (8). – P. 4515–4520. – DOI : 10.1016/j.apsusc.2008.11.071.

29. Dausinger, F. Micro-machining with ultrashort laser pulses: From basic understanding to technical applications / F. Dausinger, H. Hugel, V. Konov // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. – 2003. – Vol. 5147. – P. 106–115. – DOI : 10.1117/12.537496.

30. Микрообработка материалов пикосекундными лазерами / Ф. Бахман, Д. Мюллер, Б. Климт, Р. Кнаппе // *Фотоника*. – 2013. – № 1 (37). – С. 34–40.

31. Изменения структуры поверхности кристалла YAG под действием наносекундных импульсов широкополосного лазерного излучения: морфология кратеров и деформация материала / Н. Е. Быковский, Ю. В. Сенатский, Е. В. Заведеев, В. Г. Ральченко // *Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 11-й междунар. конф. (23–25 сент. 2015 г., Минск, Беларусь)*. – Минск, 2015. – С. 39–41.

32. Черноножкин, С. М. Особенности лазерной абляции стекла и стали и их влияние на результаты ЛА-ИСП-МС анализа / С. М. Черноножкин, А. И. Сапрыкин // *Аналитика и контроль*. – 2011. – Т. 15. – № 4. – С. 413–420.

33. Вотяков, С. Л. О процессах лазерного испарения и использовании водных стандартов при ЛА-ИСП-МС-анализе ряда минералов / С. Л. Вотяков, Н. Н. Адамович // *Литосфера*. – 2011. – № 4. – С. 56–69.

34. Лазерные технологии в микрооптике. Ч. II. Изготовление элементов с трехмерным микрорельефом / А. Г. Полещук, В. П. Корольков, В. П. Вейко, Р. А. Заколдаев, М. М. Сергеев // *Автометрия*. – 2018. – № 2. – С. 3–19. – DOI : 10.15372/AUT20180201.

35. Технология создания ДОЭ / А. В. Волков, Н. Л. Казанский, В. А. Сойфер, Г. В. Успенъев // *Методы компьютерной оптики / под ред. В. А. Сойфера*. – М. : Физматлит, 2000. – С. 239–310.

36. Технология изготовления дифракционных оптических элементов методом плазмохимического травления для формирования точечных эталонных изображений / С. Б. Одинокоев, Г. Р. Сагателян, А. Б. Соломашенко, Е. А. Дроздова // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 9 (21). – С. 1–17.

37. Riedl, M. Analysis and performance limits of diamond turned diffractive lenses for 3-5 and 8-12 micrometer region / M. Riedl, J. McCann // Proceedings of SPIE – Infrared optical design and fabrication: a critical review. – 1991. – Vol. 10260. – P.1026.08.

38. Gorbunov, A. A. Nanostructuring of laser-deposited Ti films by self-limited oxidation / A. A. Gorbunov, H. Eichler, W. Pompe // Journal of the American Ceramic Society. – 1997. – Vol. 80. – № 7. – P. 1663–1667.

39. Self-Limitation of the Laser-Induced Thermochemical Reactions in Ultrathin Films / A. A. Gorbunov, H. Eichler, W. Pompe, B. Huey, D. A. Bonnell, A. D. Akhsakhalyan // Proceedings of SPIE. – 1997. – Vol. 3093. – P. 127–136.

40. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы // У. Моро. – М. : Мир, 1990. – Т. 1, 2.

41. Точность изготовления дифракционных оптических элементов лазерными записывающими системами с круговым сканированием / В. П. Коронкевич, В. П. Корольков, А. Г. Полещук, А. А. Харисов, В. В. Черкашин // Компьютерная оптика. – 1997. – № 17. – С. 63–74.

42. Шпейзман, В. В. Использование интерферометрического метода измерения величины и скорости перемещений для неразрушающего контроля материала / В. В. Шпейзман, Н. Н. Песчанская // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49. – №. 7. – С. 1201–1205.

43. Лысенко, О. Н. Триангуляционные датчики расстояния / О. Н. Лысенко // Автоматизация в промышленности. – 2006. – № 11. – С. 13–16.

44. Confocal microoptical distance-sensor: principle and design / C. Pruss Ruprecht, H. J. Tiziani, W. Osten, P. Lücke, A. Last, J. Mohr, P. Lehmann //

Proceedings of SPIE – Optical Measurement Systems for Industrial Inspection. – 2005. – Vol. 5856. – P. 128–135.

45. Tiziani, H. J. Confocal principle for macro- and microscopic surface and defect analysis / H. J. Tiziani, M. Wegner, D. Steudle // *Optical Engineering*. – 2000. – Vol. 39. – № 1. – 32–39.

46. Radtke, Daniela. Laser-lithography on non-planar surfaces / Daniela Radtke and Uwe D. Zeitner // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15. – № 3. – P. 1167–1174.

47. Lithographic fabrication of diffractive optical elements in hybrid sol-gel glass on 3D curved surfaces / Taisheng Wang, Weixing Yu, Dengying Zhang, et. al. // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18. – № 24. – P. 25102–25107.

48. Luo, J. Dynamic scan detection of focal spot on nonplanar surfaces: theoretical analysis and realization / J. Luo, Y. Liang, G. Yang // *Optical Engineering*. – 2011. – Vol. 50 (7). – P. 073601.

49. Liang, F. Key techniques of laser direct writing of fine lines on the spherical surface / F. Liang, J. Hu // *Proceedings of SPIE*. – 2006. – Vol. 6034. – P. 60340G.

50. Parallelized chromatic confocal sensor systems / M. Hillenbrand, A. Grewe, M. Bichra, R. Kleindienst, L. Lorenz, R. Kirner, R. Weiß, S. Sinzinger // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 8788. – P. 87880V. – DOI : 10.1117/12.2020334.

51. Spectral characteristics of chromatic confocal imaging systems / M. Hillenbrand, B. Mitschunas, F. Brill, A. Grewe, S. Sinzinger // *Applied Optics*. – 2014. – Vol. 53, № 32. – P. 7634–7642.

52. Tunable hyperchromatic lens system for confocal hyperspectral sensing / P. H. Cu-Nguyen, A. Grewe, M. Hillenbrand, S. Sinzinger, A. Seifert, H. Zappe // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21. – № 23. – P. 27611–27621. – DOI : 10.1364/OE.21.027611.

53. An imaging spectrometer employing tunable hyperchromatic microlenses / P. Cu-Nguyen¹, A. Grewe, P. Feßer, A. Seifert, S. Sinzinger, H. Zappe // *Light: Science & Applications*. – 2016. – № 5. – e16058. – DOI: 10.1038/lsa.2016.58.

54. A chromatic confocal probe with a mode-locked femtosecond laser source / X. Chen, T. Nakamura, Y. Shimizu, C. Chen, Y.-L. Chen, H. Matsukuma, W. Gao //

Optics and Laser Technology. – 2018. – № 103. – P. 359–366. – <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.051>.

55. Chromatic confocal setup for displacement measurement using a supercontinuum light source / U. Minoni, G. Manili, S. Bettoni, E. Varrenti, D. Modotto, C. DeAngelis // Optics and Laser Technology. – 2013. – № 49. – P. 91–94. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.11.006>.

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

57. Handbook of Optics. MacGraw-Hill Companies, Inc. – 1995. – Vol. I. – P. 31.14–31.15.

58. 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.

59. Hybrid hyperchromats for chromatic confocal sensor systems / M. Hillenbrand, B. Mitschunas, C. Wenzel, A. Grewe, X. Ma, P. Feßer, M. Bichra, S. Sinzinger // Advanced Optical Technologies. – 2012. – Vol. 1. – P. 187–194. – DOI : 10.1515/aot-2012-0017.

60. Spectrally multiplexed chromatic confocal multipoint sensing / M. Hillenbrand, L. Lorenz, R. Kleindienst, A. Grewe, S. Sinzinger // Optics Letters. – 2013. – Vol. 38. – № 22. – P. 4694–4697. – <http://dx.doi.org/10.1364/OL.38.004694>.

61. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1970. – 720 с.

62. 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.

63. Джадд, Д. В. Цвет в науке и технике / Д. В. Джадд, Г. Вышецки. – М. : Мир, 1978. – 592 с.
64. Кривошеев, М. И. Цветовые измерения / М. И. Кривошеев, А. К. Кустарев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
65. Домасев, М. Цвет. Управление цветом, цветовые расчеты и измерения / М. Домасев, С. Гнатюк. – СПб. : Питер, 2009. – 224 с.
66. Соболев, И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев. – М. : Наука, 1968. – 64 с.
67. Мануал ZEMAX [Электронный ресурс] / Режим доступа : <http://www.zemax.com>.
68. 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.
69. 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.
70. Knyazev, V. A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements / V. A. Knyazev, G. N. Kulipanov, N. A. Vinokurov // Measurement Science and Technology. – 2010. – Vol. 21. – P. 054017.
71. Герасимов, В. В. Особенности спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения в терагерцовом диапазоне / В. В. Герасимов, Б. А. Князев // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2008. – Т. 3. – Вып. 4. – С. 97–112.
72. Huber, A. J. Infrared spectroscopic near-field mapping of single nanotransistors / A. J. Huber, J. Wittborn and R. Hillenbrand // Nanotechnology. – 2010. – Vol. 21. – P. 235702.

73. Hillenbrand, R. Phonon-enhanced light-matter interaction at the nanometre scale / R. Hillenbrand, T. Taubner and F. Keilmann // *Nature*. – 2002. – Vol. 418. – P. 159–162.

74. Taubner, T. Nanoscale polymer recognition by spectral signature in scattering infrared near-field microscopy / T. Taubner, R. Hillenbrand and F. Keilmann // *Applied Physical Letters*. – 2004. – Vol. 85. – P. 5064–5066.

75. Terahertz, near-field nanoscopy of mobile carriers in single semiconductor nanodevices / A. J. Huber, F. Keilmann, J. Wittborn, J. Aizpurua, R. Hillenbrand // *Nano Letters*. – 2008. – Vol. 8. – P. 3766–3770.

76. Взаимодействие терагерцового электромагнитного излучения с системой зонд-объект в терагерцовом безапертурном микроскопе / В. Н. Трухин, А. В. Андрианов, В. А. Быков и др. // *Письма в ЖЭТФ*. – 2011. – Т. 93. – Вып. 3. – С. 134–138.

77. Infrared Spectroscopic Mapping of Single Nanoparticles and Viruses at Nanoscale Resolution / M. Brehm, T. Taubner, R. Hillenbrand and F. Keilmann // *Nano letters*. – 2006. – Vol. 6. – P. 1307–1310.

78. 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 НП СО РАН*. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2012. – С. 409–427.

79. 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.

Версии: A terahertz scanning near-field optical microscope with an attenuated total internal reflection module / V. P. Barsukov, A. G. Verhoglad, 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.

80. Булгакова, Н. М. Исследование динамики и механизмов лазерной абляции в режимах милли-, нано- и фемтосекундных импульсов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.14 / Надежда Михайловна Булгакова. – Новосибирск, 2002. – 385 с.

81. Роль низкопорогового пробоя воздуха в абляции материалов короткими лазерными импульсами / С. М. Климентов, С. В. Гарнов, В. И. Конов, Т. В. Кононенко, П. А. Пивоваров, О. Г. Царькова, Д. Брайт-линг, Ф. Даусингер // *Труды Института общей физики им. А.М. Прохорова*. – 2004. – Т. 60. – С. 13–17.

82. *Adaptive Optics for Vision Science: Principles, Practices, Design, and Applications* / Ed. by J. Porter, H. Queener, J. Lin et al. – N. Y. : John Wiley & Sons, Inc, 2006. – 600 p.

83. 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.

84. Вакс, Е. Д. Практика прецизионной лазерной обработки / Е. Д. Вакс, М. Н. Миленский, Л. Г. Сапрыкин. – М. : Техносфера, 2013. – 696 с.

85. Занавескин, М. Л. Микрофлюидика и ее перспективы в медицине / М. Л. Занавескин, А. А. Миронова, А. М. Попов // *Молекулярная медицина*. — 2012. – № 5. – С. 9–16.

86. Beam shaping of focused beams for microprocessing applications / A. Laskin, H. Bae, V. Laskin, A. Ostrun // *Proc. ICALEO 2014*. – 2014. – P136.

87. Sugioka, K. 3D microstructuring of glass by femtosecond laser direct writing and application to biophotonic microchips / K. Sugioka, Y. Hanada, K. Midorikawa // *Progress In Electromagnetics Research Letters*. – 2008. – Vol. 1. – P. 181–188.

**ПРИЛОЖЕНИЕ «А» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И СПРАВКА ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В НАУЧНЫХ ЦЕНТРАХ**

1. Акт внедрения круговой лазерной записывающей системы в Харбинском институте технологий (Китайская Народная Республика).

АКТ

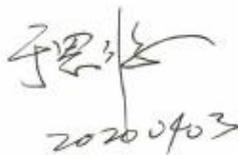
On using the results
of Zavyalova Marina Andreevna's dissertation work
**“Development and investigation of optical noncontact
high-resolution sensors for monitoring
of working surfaces position for operational control of laser processes”**

According to Contract No. 09KJ116-HGD-02 dated March 19, 2009 by TDI SIE SB RAS (Russia) together with IAE SB RAS in 2009-2011 the high-precision 3D laser image generator was developed. Under Contract's fulfillment the results of dissertation work of TDI SIE SB RAS's scientist Zavyalova M.A. was used. These results includes the study of a high-resolution position sensor based on the Foucault knife, which allows to control the distance between the focusing micro-lens and the surface being treated. According to the requirements of the specification, she realized the possibility of treating both flat and spherical (convex and concave) surfaces with a tangent angle to the circle of not less than 5° for different types of photosensitive materials (chromium, photoresist). In addition to the function of autofocusing the operating radiation, the Foucault knife-based position sensor allows automatic search for the focal plane of the micro-lens and measurement of the size of the focused laser spot.

During technological exploitation of the 3D laser image generator, as well as the position sensor based on Foucault knife proved to be a reliable device, allowing to control the position of treated surfaces during high-speed laser processes without preliminary calibration. Since 2011 year the generator has allowed to synthesize a large number of optical elements, including splitting prism, combined beams prism, collimating lens, and so on for some research projects, namely miniaturized laser communication terminal research projects.

School of Astronautics, Harbin Institute of Technology

Signature


2020 04 03



2. Акт внедрения станции лазерной записи в Самарском государственном аэрокосмическом университете (Россия, г. Самара).



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Завьяловой Марины Андреевны

В ходе выполнения научно-исследовательских работ в НИЛ-35 широко использовалась станция лазерной записи, изготовленная в ИАиЭ СО РАН. За время эксплуатации станции лазерной записи было синтезировано большое количество оптических элементов: дифракционных линз, решеток, моданов, аксиконов, фильтров угловых гармоник, линз-решёток. На сферических поверхностях записываются дифракционные решетки на различных типах светочувствительных материалов (хром, фоторезист). Станция показала себя как высокопроизводительное оборудование, выполняющее все возложенные на неё задачи.

Результаты диссертационной работы Завьяловой М. А. использовались в ходе выполнения КТИ НП СО РАН совместно с ИАиЭ СО РАН в 2012–2013 гг. работ по контракту № 35-6/12038-42 от 11 мая 2012 года "Станция лазерной записи" для Самарского государственного аэрокосмического университета (Россия, г. Самара). Ею был внесён основной вклад в создание датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко и микроскопа записи на его основе. Были исследованы предельные характеристики датчика в составе станции: зависимость рабочего диапазона от компоновки схемы и предельные углы наклона касательной к выпуклым и вогнутым поверхностям обрабатываемых деталей. В результате разработанный ею микроскоп записи с датчиком автофокусировки на основе ножа Фуко позволил контролировать положение плоских или криволинейных поверхностей в ходе лазерных технологических процессов с погрешностью не более $\pm 0,2$ мкм в диапазоне ± 60 мкм при наличии достаточно быстрых (до 20–30 Гц) осцилляций поверхности и угле наклона касательной к поверхности до 8° . Совместно с группой разработчиков Завьяловой М.А. были проведены пуско-наладочные работы и испытания станции.

Зав. НИЛ-35

Р.В. Скиданов

3. Справка об использовании ближнепольной сканирующей приставки в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения на базе Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск).

Справка

об использовании результатов диссертационной работы Завьяловой Марины Андреевны "Разработка и исследование оптических бесконтактных высокоразрешающих датчиков контроля положения рабочих поверхностей для оперативного управления лазерными технологическими процессами"

Результаты диссертационной работы Завьяловой М. А. использовались в ходе выполнения КТИ НП СО РАН совместно с ИЯФ СО РАН интеграционного проекта СО РАН № 89 «Разработка метода терагерцовой изображающей спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения с функцией ближнепольного микроскопа» (2009–2011 гг.). Разработанный ею волоконный конфокальный датчик на основе хроматического кодирования и созданный на его основе макетный образец ближнепольной приставки к изображающему спектрометру нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО- спектрометр) позволил позиционировать зонд с точностью 0.5 мкм, что равно 1/260 используемой длины волны терагерцового излучения.

НПВО-спектрометр был использован для исследования возможности регистрации в динамике пространственного распределения биомедицинских объектов, в том числе образцов плазмы крови, и тонких пленок эванесцентными волнами, возникающими при освещении внутренней поверхности кремниевой призмы, в экспериментах на длине волны 130 мкм, проводившихся на Новосибирском лазере на свободных электронах совместно с НИИ терапии СО РАН и НИИ молекулярной биологии и биофизики СО РАН.

Ближнепольная приставка и вошедший в её состав волоконный конфокальный датчик на основе метода хроматического кодирования показали себя как высокопроизводительное оборудование, выполняющее все возложенные на него задачи.

Уч. Секретарь ИЯФ СО РАН, к.ф.-м.н. Аракчеев А.С.
27.03.2020

Составил:

Г.н.с.с ИЯФ СО РАН, д.ф.-м.н. Князев Б.А.
27.03.2020



ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

1. Акт внедрения двухканальной круговой лазерной записывающей системы для синтеза микроструктурированных компонентов новой элементной базы для оптоэлектронного приборостроения, фотоники и микромеханики в АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (Россия, г. Екатеринбург).



АО «ПО «УОМЗ», Екатеринбург, 620100, Восточная ул. 336

Фамилия	И.В. Самойлов
Подразделение	Главный технолог
Телефон	+7(343) 229-88-47
Телефакс	+7(343) 254-81-09
e-mail	kanceljariya@uomz.com

Новосибирск
Российская Федерация

Предмет	Акт внедрения
Дата	16.06.2020
№	

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы научного сотрудника КТИ НП СО РАН Марины Андреевны Завьяловой

При выполнении КТИ НП СО РАН (совместно с ИАиЭ СО РАН) в 2012–2013 гг. ОКР «Разработка высокоточного 3D лазерного генератора изображений и модернизация лазерной круговой записывающей системы CLWS-300» для ОАО «ПО «УОМЗ» (договор № 177-12 от 31 мая 2012 года) были использованы результаты диссертационной работы Завьяловой М.А. Ею был разработан и модифицирован высокоразрешающий датчик автоматической фокусировки на основе ножа Фуко. Датчик позволил контролировать с высокой точностью положение плоских или криволинейных поверхностей при реализации лазерных технологических процессов: погрешность не более $\pm 0,2$ мкм в диапазоне ± 60 мкм при быстрых осцилляциях поверхности (до 20–30 Гц) и угле наклона касательной к поверхности до 8° . Завьяловой М.А. были проведены пуско-наладочные работы генератора, а также испытания системы автофокусировки в его составе. В результате испытания было установлено, что её технические характеристики соответствуют требованиям технического задания.

За время эксплуатации лазерного генератора изображений были изготовлены фотошаблоны, лимбы, сетки, тест-таблицы для коммерческих разработок. Данная система зарекомендовала себя как надёжное, высокопроизводительное устройство, позволяющее изготавливать фотошаблоны большого формата (до 260 мм) и высокого качества.

Главный технолог

И.В. Самойлов



Акционерное общество
«Производственное объединение
«Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова»

Адрес для корреспонденции:
Почтовое отделение 620100
Екатеринбург, Восточная ул. 336

Тел.: +7 (343) 229-81-09
Факс: +7 (343) 254-81-09

Руководство:
Генеральный директор Слудных А.В.
Исполнительный директор Шкуревич К.В.
Главный бухгалтер Кузьмина Н.Н.

исп. Яковлев О.Б., тел. (343) 229-82-20



2. Акт внедрения прецизионного лазерного технологического комплекса для производства оптических шкал, сеток, фотошаблонов и синтезированных голограмм на основе лазерной трехмерной микро- и нанообработки на АО «Новосибирский приборостроительный завод».

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО «НПЗ»

В.А. Рассохин



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Завьяловой Марины Андреевны

Результаты диссертационной работы Завьяловой М. А. использовались в ходе выполнения КТИ НП СО РАН совместно с ИАиЭ СО РАН в 2014 г. работ по договору № 16-14-64/628 от 28.03.2014 года "Прецизионный лазерный технологический комплекс для производства оптических шкал, сеток, фотошаблонов и синтезированных голограмм на основе лазерной трехмерной микро- и нанообработки" для АО «Новосибирский приборостроительный завод». Основной вклад в создание системы автофокусировки и микроскопа записи на её основе был внесён Завьяловой М.А., которая с помощью моделирования оптической схемы датчика автоматической фокусировки на основе ножа Фуко исследовала его предельные характеристики в составе лазерного технологического комплекса, а именно: зависимость рабочего диапазона от компоновки схемы и предельные углы наклона касательной к выпуклым и вогнутым поверхностям обрабатываемых деталей. Разработанный ею микроскоп записи с датчиком автофокусировки, вошедший в состав технологического комплекса, позволяет контролировать положение плоских или криволинейных поверхностей в ходе лазерных технологических процессов с погрешностью не более $\pm 0,2$ мкм в диапазоне ± 60 мкм при наличии достаточно быстрых (до 20–30 Гц) осцилляций поверхности и угле наклона касательной к поверхности до 8° . Завьяловой М.А. были проведены пуско-наладочные работы и испытания комплекса.

За время эксплуатации лазерного технологического комплекса, с 2015 года по настоящее время, были изготовлены следующие фотошаблоны:

- лимбов для фотоэлектрических и оптико-механических углоизмерительных приборов - 9 штук;
- миры ГОИ №1,2,3,4,5;
- полутонных дифракционных транспарантов - 2 штук;
- сеток для контрольно-юстировочных приборов – 15 штук;

- сеток для перспективных и серийно выпускаемых прицелов - 55 штук.
- прецизионных маскирующих противосеток для прицелов – 23 штуки;
- сеток для оптико-механических измерительных приборов – 33 штуки.

С момента внедрения и по сегодняшний день комплекс работает в производственной цепочке лазерной трехмерной микро- и нанообработки и показал себя как высокопроизводительное оборудование, выполняющее все возложенные на него задачи.

Технический директор



Ю.А. Трясов