

Российская академия наук
Дальневосточное отделение

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт
автоматики и процессов управления ДВО РАН»

УДК 535.331, 538.9
ВГК ОКП
№ госрегистрации: 01201250187
Инв. №



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИАПУ ДВО РАН,
академик

Ю.Н.Кульчин

«17» мая 2013 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Адаптивные сверхчувствительные измерительные системы для нанометрологии на
основе физических принципов, разрабатываемых совместно с Университетом
Восточной Финляндии

(заключительный)

этап четвертый

Обобщение и оценка полученных результатов. Выработка рекомендаций

2011-1.9-519-001-008

Государственный контракт от «18» августа 2011 г. № 11.519.11.3002 с
дополнительным соглашением от «06» марта 2012 г. №1 в рамках ФЦП
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-
технологического комплекса России на 2007-2013 годы»





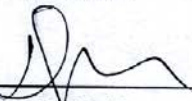

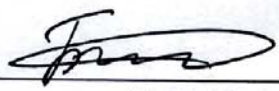
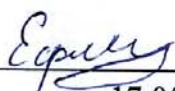


Научный руководитель,
академик, д.ф.-м.н., профессор


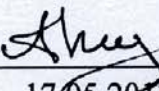
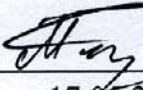
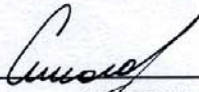


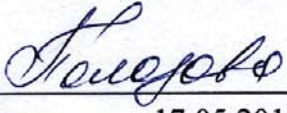
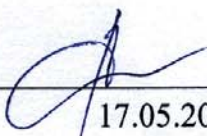

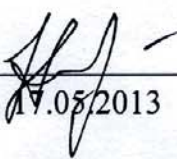
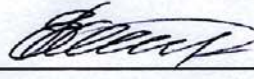
Ю.Н. Кульчин

17.05.2013 г.

Владивосток 2013

Список исполнителей

Научный руководитель, академик, д.ф.-м.н., профессор	 _____ 17.05.2013	Ю.Н.Кульчин (Введение, заключение)
Исполнители темы:		
В.н.с., д.ф.-м. н.,	 _____ 17.05.2013	Р.В. Ромашко (Разделы 1, 3)
В.н.с., д.ф.-м. н.	 _____ 17.05.2013	О.Т.Каменев (раздел 1)
Г.н.с., д.ф.-м.н.	 _____ 17.05.2013	О.Б.Витрик (раздел 1)
Г.н.с., д.ф.-м. н.	 _____ 17.05.2013	В.П.Дзюба (разделы 1)
С.н.с., к.ф.-м. н.	 _____ 17.05.2013	А.В. Дышлюк (раздел 1)
Аспирант, м.н.с.	 _____ 17.05.2013	М.Н.Безрук (раздел 1)
Аспирант, лаборант	 _____ 17.05.2013	Т.А.Ефимов (раздел 1)
Аспирант, инженер- электронщик	 _____ 17.05.2013	В.А.Колчинский (раздел 1)
М.н.с.	 _____ 17.05.2013	А.А.Коротенко (раздел 1)

М.н.с.	 17.05.2013	Н.П.Краева (раздел 1)
М.н.с., к.ф.-м.н.	 17.05.2013	А.А.Кучмижак (раздел 1)
Лаборант	 17.05.2013	М.А.Асалханова (раздел 1)
Аспирант, инженер-программист	 17.05.2013	А.В.Амосов (раздел 1)
Аспирант, инженер-электронщик	 17.05.2013	А.Ю.Попик (раздел 1)
Аспирант, инженер-программист	 17.05.2013	А.Ю.Жижченко (раздел 1)
Инженер-программист	 17.05.2013	Н.И.Полозова (раздел 1)
Аспирант, инженер	 17.05.2013	В.А.Миличко (раздел 1)
Инженер-программист	 17.05.2013	А.А.Сергеев (раздел 1)
Аспирант, инженер	 17.05.2013	А.В.Непомнящий (раздел 1)
Нормоконтролер	 17.05.2013	Е.Л. Гамаюнов

Реферат

Отчет 87 с., 13 рис., 5 табл., 51 источник

АДАПТИВНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР, ДИНАМИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАММА, ФОТОРЕФРАКТИВНЫЙ КРИСТАЛЛ, СЛАБЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, МИКРООСЦИЛЛЯТОР

Целью выполнения НИР является разработка принципов создания новых сверхчувствительных, высокоточных адаптивных измерительных систем на основе использования динамических фоторефрактивных голограмм для решения практических задач нанометрологии, связанных с регистрацией и измерением сверхмалых физических параметров, характеризующих состояние элементов, систем и устройств объектов nanoиндустрии в процессе их создания и эксплуатации.

В ходе выполнения настоящей НИР получены следующие результаты.

В ходе 1-го этапа НИР выполнен аналитический обзор и проведен патентный поиск существующих подходов и методов в построении измерительных систем, применяемых в практических задачах нанометрологии, включая измерение линейных наноперемещений, наноколечаний, профиля поверхности, масс и размеров нанообъектов, параметров слабых электрических и магнитных полей и пр. Результаты анализа свидетельствуют о перспективности выбранного подхода в создании нового класса ультрачувствительных помехоустойчивых систем нанометрологии на основе поляризационно-независимых (ПН) адаптивных интерферометров.

Предложена новая геометрия ортогонального трёхволнового 3D-взаимодействия в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии.

Теоретически показано и экспериментально обосновано, что в схеме трёхволнового взаимодействия объектного пучка с двумя опорными, распространяющимися во взаимно ортогональных направлениях в ФРК кубической симметрии вдоль его основных кристаллографических осей [100], [010] и [001], в последнем формируется три динамических голограммы, дифракция волн на которых в соответствие носит анизотропный характер. Показано, что на базе

ортогонального трёхволнового взаимодействия может быть реализован полностью поляризационно-независимый адаптивный интерферометр, в котором объектная волна может иметь произвольное состояние поляризации, что в свою очередь позволяет свести к предельному минимуму поляризационные шумы, понизить порог детектирования, увеличить динамический диапазон измерения. Выполнено экспериментальное исследование процессов фазовой демодуляции излучения с разным поляризационным и модовым составом в адаптивном интерферометре на основе динамических голограмм, сформированных в геометрии трехволнового ортогонального взаимодействия с использованием двух эллиптически поляризованных опорных волн. Показано, что динамическая голограмма, сформированная в 3D-ортогональной трехволновой геометрии, способна обеспечить устойчивую поляризационно-независимую демодуляцию фазы световой волны, полученной как на выходе одномодового, так и многомодового волоконного световодов.

Предложен и исследован принцип мультиплексирования ортогональных динамических голограмм, в рамках которого объектные световые пучки распространяются в кристалле вдоль основного кристаллографического направления, где взаимодействуют с двумя опорными эллиптически поляризованными пучками, распространяющимися под углом в 90 градусов к объектным. Определены условия, выполнение которых позволяет исключить возможность появления перекрестных помех между каналами, ассоциированными с мультиплексируемыми голограммами. В ходе экспериментального исследования процесса мультиплексирования динамических голограмм, показано, что уровень перекрестных помех между каналами остается ниже уровня собственных шумов в канале даже в случае полного перекрытия световых полей отдельных каналов в кристалле.

На основе геометрии ортогонального трехволнового взаимодействия практически реализована работа 6-ти канального адаптивного волоконно-оптического интерферометра, в котором в качестве сенсоров используются стандартные многомодовые волоконные световоды. Показано, что перекрестные шумы между каналами интерферометра не связаны с взаимодействием волн в фоторефрактивном кристалле и не превышают уровня 1% от основного сигнала в

канале, что служит экспериментальным подтверждением независимости работы каналов.

В ходе 2-го этапа НИР разработан и изготовлен экспериментальный макет и выполнены экспериментальные исследования измерительной системы (ИС) на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра, оптимизированного для регистрации и измерения наномасштабных перемещений и колебаний макро- и микрообъектов. В качестве тестовых микрообъектов были использованы волоконные световоды, а также микрокантилеверы. Определены рабочие характеристики системы, а также критерии применимости ИС для регистрации перемещений. Установлено, что в режиме регистрации перемещений работа измерительной системы определяется соотношением скорости перемещения и некоторой характерной скорости системы V_0 , определяемой временем записи динамической голограммы в кристалле, которая для использованного в работе кристалла CdTe составила 2,2 мкм/с. Показано, что наиболее устойчивая работа измерительной системы обеспечивается при измерении перемещений со скоростями близкими или превышающими V_0 . При этом минимальный порог детектирования перемещений составил: в режиме регистрации медленных перемещений (при скоростях меньше характерной) - 1,9 нм; в режиме регистрации перемещений со скоростями близкими к характерной - 1,7 нм; в режиме регистрации быстрых перемещений (при скоростях больше характерной) - 1,6 нм. Динамический диапазон измерений наноперемещений 42 дБ. Чувствительность измерительной системы в режиме регистрации нанокосебаний составила $1,8 \times 10^{-7}$ нм(Вт/Гц)^{1/2}. В работе определены оптимальные параметры формы объектного пучка интерферометра, позволяющие обеспечить наиболее эффективный контроль перемещений и колебаний микромасштабных объектов.

Разработан экспериментальный макет многоканальной поляризационно-независимой адаптивной интерферометрической измерительной системы (МАИИС) на основе мультиплексирования ортогональных динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии, оптимизированной для регистрации параметров слабых динамических полей и проведены экспериментальные исследования функционирования системы в задачах регистрации параметров слабых распределенных вибрационных полей.

Реализована система с 26-ю каналами. Определена чувствительность системы, эквивалентная порогу детектирования перемещений поверхности, которая составила $(0,97 \pm 0,3) \times 10^{-6} \text{ нм(Вт/Гц)}^{1/2}$ на канал. Показано, что разработанная МАИИС способна обеспечить регистрацию и восстановление пространственных распределений вибрационных полей с амплитудой от 2,2 мкм до 110 мкм с пространственным разрешением $1,3 \text{ см}^{-1}$.

В ходе 3-го этапа НИР создан экспериментальный макет и проведены экспериментальные исследования измерительной системы на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра для измерения сверхмалых масс микро- и нанообъектов, включая наночастицы. В качестве чувствительного элемента измерительной системы используются кремниевые кантилеверы прямоугольной формы. Возбуждение собственных колебаний кантилеверов осуществляется оптическим методом с помощью импульсного лазера.

Экспериментально определена толщина тонкой золотой пленки, образованной на кантилевере в вакуумной камере, посредством измерения смещения частоты собственных колебаний кантилевера. Толщина пленки составила 32 нм, масса 3,1 нг, что хорошо согласуется с толщиной пленки измеренной в сканирующем электронном микроскопе, которая составила $25 \pm 8 \text{ нм}$. Для апробации работы измерительной системы в задаче измерения масс микро и нанообъектов на кантилеверы помещались частицы золота с диаметром от 40 до 300 нм, после чего кантилеверы устанавливались в измерительную систему. Каждый лазерный импульс, возбуждающий колебания, приводил к отсоединению от кантилевера некоторого количества частиц, что приводило к соответствующему изменению частоты колебаний. Чувствительность измерительной системы составила $1,7 \times 10^{12} \text{ Гц/г}$, порог детектирования $8,5 \times 10^{-12} \text{ г}$. Выполнена оптимизация параметров микрокантилевера, выполняющего функцию чувствительного элемента интерферометра, с целью детектирования объектов массой порядка 10^{-14} г . Показана потенциальная возможность уменьшения порога детектирования до 10^{-16} г .

Разработан экспериментальный макет измерительной волоконно-оптической системы на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра для

измерения слабых электрических и магнитных полей. Основным принципом работы системы заключается в преобразовании переменного магнитного поля в фазовую модуляцию излучения, проходящего по многомодовому волоконному световоду, с помощью магниточувствительного кантилевера с прикрепленным на его свободном конце постоянным магнитом и участком многомодового волоконного световода, также прикрепленного к кантилеверу. В ходе экспериментальных исследований обнаружено, что наибольшая чувствительность измерительной системы достигается в том случае, когда волоконный световод находится в состоянии статического натяжения. Установлено, что при проектировании сенсора необходимо также учитывать резонансный характер кантилевера, поскольку чувствительность сенсора существенно зависит от соотношения частот детектируемого сигнала $F_{\text{раб}}$ и резонансной частоты кантилевера $F_{\text{рез}}$. Показано, что при оптимальном отношении частот $F_{\text{рез}}/F_{\text{раб}}=1,19$ чувствительность сенсора составляет 0,28 дБ/мкТл и динамический диапазон 11 дБ.

В ходе заключительного этапа НИР проведена дополнительная серия экспериментов с целью исследования возможности и определения путей улучшения характеристик измерительных систем на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра. Исследована работа адаптивного интерферометра при взаимодействии объектных и опорных волн с разным состоянием поляризации, задаваемыми при помощи четверть волновых пластинок, в схемах двухволнового (2D) и трехволнового (3D) ортогональных взаимодействий. Экспериментально показано, что переход от схемы 2D взаимодействия к 3D, позволяет существенно снизить флуктуации амплитуды сигнала демодуляции, вызванные изменением поляризационного состояния объектной волны. Установлено, что оптимальным между плоскостью поляризации опорной волны и быстрой осью второй четвертьволновой пластинки при этом является угол в 84° , при котором режим работы адаптивного интерферометра приближается к поляризационно-независимому: флуктуации сигнала демодуляции снижаются до 18% (минимальное значение глубины модуляции выходного сигнала 2,8%, максимальное – 3,4%).

Проведены эксперименты, направленные на изучение работы систем на основе адаптивных поляризационно-независимых интерферометров при малых

интенсивностях излучения опорных и объектного пучков, которые позволяют достичь «щадящего» режима работы системы по отношению к исследуемому объекту и уменьшают энергопотребление всей системы в целом. Установлено, что уменьшение мощности входного излучения в 10 раз сопровождается снижением демодуляционного сигнала всего в 2 раза. При этом работоспособность системы сохраняется вплоть до снижения интенсивности объектного пучка до уровня, равного пределу чувствительности фотоприемника.

В разработанной многоканальной адаптивной интерферометрической измерительной системе (МАИИС) исследовано влияние соотношения интенсивностей опорных и сигнальных световых пучков на уровень чувствительности в отдельно взятом канале при разном количестве одновременно включенных каналов. Установлено, что включение дополнительных работающих каналов не оказывает заметного влияния на работу отдельно взятого канала. При этом оптимальное соотношение интенсивностей, при котором достигается минимальный порог детектирования (18 ± 3), составило 0,15.

Выполнено численное моделирование работы сенсорной части МАИИС, сравнение его с экспериментальными результатами и теоретическим расчетом с целью проверки, насколько точно измерительные линии повторяют деформации исследуемой поверхности. В рамках моделирования рассчитывалось удлинение измерительных линий, жестко закрепленных на исследуемой поверхности, совершающей поперечные колебания. На основе удлинений измерительных линий рассчитывался сигнал на выходе из каждой линии, формируя тем самым набор томографических данных, который в свою очередь использовались для численного моделирования восстановления колебаний поверхности. Сравнение результатов численного моделирования с томографическим восстановлением на основе экспериментальных данных, полученных ранее с помощью МАИИС, а также с учетом расчета формы колебаний упругой мембраны позволяют заключить, что сенсорная часть МАИИС действительно повторяет форму колебаний исследуемой мембраны, тем самым обеспечивая достоверное томографическое восстановление распределения ее поперечных колебаний. Таким образом, МАИИС может успешно применяться в задачах мониторинга слабых вибрационных полей.

Проведена оптимизация схемы поляризационно-независимого адаптивного интерферометра с целью снижения затрат на его изготовление. Установлено, что оптимизацию можно осуществить за счет уменьшения размеров оптомеханических элементов систем; перехода от использования юстируемых оправ для оптических элементов к неюстируемым; использования источников лазерного излучения меньшей мощности; уменьшения размеров ФРК. Показано, что проведение оптимизации позволяет снизить стоимость разработанных измерительных систем на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра на 54%.

Обзор научно-информационных источников и анализ международного и российского рынков показали, что среди измерительных систем для регистрации сверхмалых масс, наномасштабных перемещений, колебаний и вибраций, а также слабых вибрационных и электрических полей прямых аналогов разработанных в настоящей НИР систем в России и в мире нет. Показано, что проектные технологии создания приборов на основе поляризационно-независимых адаптивных интерферометров для исследований нанопроцессов является конкурентоспособными на современном рынке аналитического оборудования.

Выработаны рекомендации по дальнейшему развитию и коммерциализации поляризационно-независимого адаптивного интерферометра, предназначенного решения практических задач нанометрологии.

Все работы настоящей НИР выполнены в тесном сотрудничестве с коллективом лаборатории Оптических сенсорных технологий Департамента прикладной физики (ДПФ) Университета Восточной Финляндии (УВФ), который в соответствии с Соглашением между ИАПУ ДВО РАН и ДПФ УВФ от 24.06.2011 принял участие в обсуждении полученных результатов, подготовке совместной публикации и отчетных материалов.

Полученные в ходе НИР результаты вносят существенный вклад в развитие исследований многоволновых взаимодействий в нелинейных оптических средах. Результаты могут быть положены в основу создания сверхвысокочувствительных помехоустойчивых систем нанометрологии.

Результаты НИР были использованы при модернизации образовательной программы 210100 «Электроника и нанoeлектроника», в том числе лекционных курсов «Метрология, стандартизация и технические измерения», «Нелинейная

оптика», «Материалы и элементы квантовой и оптической электроники», а также при организации преддипломной и производственной практики студентов базовых кафедр ДВФУ, и при подготовке 6 дипломных и 3 кандидатских диссертационных работ.

Содержание

	стр.
Обозначения и сокращения	13
Введение	14
1. Проведение дополнительной серии экспериментов с целью исследования возможности и определения путей улучшения характеристик измерительных систем на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра	17
2. Оптимизация схемы ПН адаптивного интерферометра с целью снижения затрат на его изготовление (из отчёта иностранного исполнителя)	35
3. Обобщение и оценка полученных результатов (из отчёта иностранного исполнителя)	40
3.1. Обобщение результатов исследований	40
3.2. Сопоставление анализа научно-информационных источников и результатов теоретических и экспериментальных исследований и оценка эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем	54
4. Разработка рекомендаций по использованию результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках (из отчёта иностранного исполнителя).....	67
Заключение	77
Список использованных источников	84

Обозначения и сокращения

В настоящем отчете о НИР применяют следующие обозначения и сокращения:

АСМ	- атомно-силовой микроскоп
ДГ	- динамическая голограмма
ИС	- измерительная система
ЛИИН	- линейный измеритель интерференционный перемещений
МАИИС	- многоканальная адаптивная интерферометрическая измерительная система
МВС	- многомодовый волоконный световод
НДС	- напряженно-деформируемое состояние
ОПД	- относительный порог детектирования
ПН	- поляризационно-независимый
ПШ	-поляризационный шум
РЭМ	- растровый электронный микроскоп
СЗМ	- сканирующий зондовый микроскоп
СКВИД	- сверхпроводящий квантовый интерферометр
ФРК	- фоторефрактивный кристалл
ЭФС	- электронно-фазометрическая система

Введение

Бурное развитие в последнее десятилетие в России и за рубежом исследований в сфере нанотехнологий неразрывно связано с необходимостью осуществления прецизионных измерений сверхмалых физических величин. Так, актуальными задачами в этой области являются контроль и измерение наномасштабных перемещений (нанопозиционеров, нанотрансляторов, зондов и пр.), регистрация наномасштабных колебаний нано- и микрообъектов (нано- и микрокантилеверов, элементов электронно-механических микро- и наносистем MEMS/NEMS), контроль линейных размеров и параметров макро- и микрообъектов с наномасштабной точностью (асферических оптических поверхностей, прецизионных механических деталей и пр.), детектирование наночастиц и определение их параметров (размеры, масса), регистрация слабых физических силовых полей, характеризующих состояние и динамику нано-, микро- и макрообъектов.

Это в свою очередь, требует наличия новых высокочувствительных и, вместе с тем, высокоточных измерительных систем, способных обеспечить решение задач нанометрологии в процессе создания и эксплуатации объектов nanoиндустрии.

Лазерные измерительные технологии находят широкое применение в задачах метрологии, в то время как методы оптической интерферометрии рассматриваются как одни из наиболее чувствительных для регистрации сверхмалых физических величин. Так, классический интерферометр обладает потенциальной возможностью регистрировать, например, динамические перемещения с разрешением менее 0,001 нм в полосе частот 100 кГц при использовании излучения мощностью 1 мВт на длине волны 500 нм [1]. Вместе с тем, такая высокая чувствительность интерферометрических систем делает их в значительной степени подверженными влиянию внешних неконтролируемых факторов (случайные механические воздействия, дрейф температуры, давления и пр.), что в большинстве случаев делает невозможным или крайне затруднительным практическое применение интерферометрических систем в реальных условиях. Применение же в схеме интерферометра электронных систем стабилизации [2, 3] приводит к значительному усложнению измерительной

системы, непропорциональному росту ее габаритов, снижению надежности, делает затруднительным или даже невозможным построение многоканальных интерферометрических схем, так как в каждом канале необходимо реализовать схему стабилизации. Кроме того, электронные системы стабилизации, будучи подверженными влиянию электромагнитных помех, сами могут становиться источником шума в интерферометре, что оказывается существенным в задачах регистрации сверхслабых величин.

Альтернативой классическому гомодинному интерферометру с активной системой стабилизации является адаптивный интерферометр, световые пучки в котором объединяются с помощью динамической голограммы (ДГ), формируемой в фоторефрактивном кристалле (ФРК) [4]. Использование ДГ позволяет не только демодулировать фазовые изменения сигнала интерферометра, но и эффективно стабилизировать его благодаря тому, что ДГ постоянно перезаписывается в кристалле, подстраиваясь тем самым под медленные изменения сигнала, вызванные неконтролируемыми воздействиями внешних факторов (дрейф температуры, давления, случайные механические воздействия, промышленные вибрации и пр.) Таким образом, измерительная система, построенная на основе динамических фоторефрактивных голограмм, приобретает адаптивные свойства, что обеспечивает ее высокую помехозащищенность и, как следствие, устойчивое детектирование слабых воздействий в реальных условиях.

Настоящий этап НИР направлен на исследования возможностей и определение путей улучшения характеристик измерительных систем (ИС) на основе поляризационно-независимого (ПН) адаптивного интерферометра с целью снижения затрат на его изготовление. Также в рамках данного этапа НИР проводится обобщение и оценка результатов, полученных в ходе всего проекта, и разрабатываются рекомендации по дальнейшему развитию и коммерциализации поляризационно-независимого адаптивного интерферометра, предназначенного для решения практических задач нанометрологии. В рамках проводимой НИР разработан проект технического задания для дальнейших исследований в последующих НИР.

Работы выполняются в сотрудничестве с коллективом лаборатории Оптических сенсорных технологий Департамента прикладной физики (ДПФ)

Университета Восточной Финляндии (УВФ) в рамках Соглашения между ИАПУ ДВО РАН и ДПФ УВФ от 24.06.2011, а также Соглашения между ИАПУ ДВО РАН и УВФ от 01.06.2011.

1 Проведение дополнительной серии экспериментов с целью исследования возможности и определения путей улучшения характеристик измерительных систем на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра

Для улучшения характеристик измерительных систем на основе адаптивных голографических интерферометров в рамках данной НИР была предложена принципиально новая схема организации адаптивного интерферометра, основанная на геометрии ортогонального трёхволнового 3D-взаимодействия в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии. Как было показано в работе [5], динамическая голограмма, формируемая в ортогональной геометрии, становится поляризационно-селективным элементом, применение которого в адаптивном интерферометре позволяет обеспечить линейный режим фазовой демодуляции полностью деполаризованной объектной волны, что в свою очередь снимает необходимость использования в схеме адаптивного интерферометра поляризационных фильтров для выделения необходимого состояния поляризации.

Геометрия трёхволнового ортогонального взаимодействия представлена на рисунке 1.1.

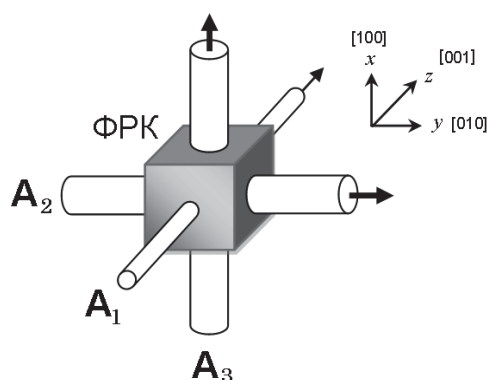


Рисунок 1.1 – Ортогональная геометрия трёхволнового 3D-взаимодействия

Объектная волна с амплитудой \vec{A}_1 взаимодействует в ФРК кубической симметрии с двумя опорными волнами с амплитудами \vec{A}_2 и \vec{A}_3 . Все волны взаимно ортогональны и распространяются в кристалле вдоль основных кристаллографических осей [001], [100] и [010], соответственно. Принимая во

внимание направление распространения волн, а также рассматривая в общем случае тип их поляризации как произвольный, представим амплитуды волн с помощью векторов Джонса в следующем виде:

$$\vec{A}_1 = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \exp i\check{\alpha} \end{pmatrix}, \quad \vec{A}_2 = \begin{pmatrix} b_y \\ b_z \exp i\check{\beta} \end{pmatrix}, \quad \vec{A}_3 = \begin{pmatrix} c_x \\ c_z \exp i\check{\chi} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

где $\check{\alpha}, \check{\beta}, \check{\chi}$ – разности фаз между ортогональными поляризационными компонентами волн \vec{A}_1, \vec{A}_2 и \vec{A}_3 соответственно.

В ортогональной геометрии трехволнового взаимодействия демодуляция фазы объектной волны, отраженной от объекта исследований, осуществляется посредством ее взаимодействия в фоторефрактивном кристалле с двумя опорными волнами, распространяющимися в кристалле по нормали к объектной волне. Как было показано на предыдущих этапах НИР, благодаря этому обеспечивается полная поляризационная независимость измерительной системы. Ортогональная геометрия взаимодействия объектной и опорных световых волн в ФРК позволяет реализовать линейный режим фазовой демодуляции, причем единственный способ гарантированно реализовать линейный режим фазовой демодуляции заключается в использовании эллиптически поляризованных опорных волн ($\check{\beta} = \check{\chi} \neq 0$). Пусть опорные волны имеют одинаковые разности фаз между ортогональными поляризационными компонентами: $\check{\beta} = \check{\chi} = \frac{\pi}{2}$. Положим также, что все параметры опорных волн, в т.ч. поляризационные, стабильны. Как правило, объектная, напротив, характеризуется потенциальной нестабильностью поляризации, имея при этом постоянную интенсивность. Вместе с тем эффективность взаимодействия таких волн, а, соответственно, и величина сигнала демодуляции будут также определяться поляризационными параметрами эллиптической волны: степени эллиптичности и ориентации главной оси эллипса, что делает актуальным поиск их оптимальных значений.

Интенсивность фазомодулированной объектной волны, взаимодействующей с двумя опорными волнами в фоторефрактивном кристалле в ортогональной геометрии, может быть представлена как:

$$\Delta I_1(\varphi) = W^{(1)}\varphi + W^{(2)}\left(1 - \frac{\varphi^2}{2}\right), \quad (1.2)$$

где $W^{(1)}$ и $W^{(2)}$ – коэффициенты, определяющие линейный и квадратичный вклады в сигнал демодуляции. Для эллиптически поляризованной объектной волны ($\hat{\alpha} \neq 0$) коэффициенты $W^{(1)}$ и $W^{(2)}$ принимают вид:

$$\begin{aligned} W^{(1)} &= \eta_0 a^2 \left[(b_y b_z \cos^2 \zeta + c_x c_z \sin^2 \zeta) - (b_y^2 + c_x^2) \cos \zeta \sin \zeta \sin \hat{\alpha} \right]; \\ W^{(2)} &= \eta_0 a^2 (b_y^2 + c_x^2) \cos \zeta \sin \zeta \sin \hat{\alpha}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

При выполнении дополнительных условий, накладываемых на составляющие опорных волн:

$$\frac{b_y}{b_z} = \frac{c_x}{c_z} \ll 1 \quad (1.4)$$

коэффициенты соответственно становятся $W^{(1)}$ – максимальным, а $W^{(2)}$ – минимальным, и независимыми при этом от поляризационных параметров объектной волны.

В рамках настоящего этапа исследована работа адаптивного интерферометра при нарушении условий поляризационной независимости систем, а именно работа интерферометра при взаимодействии одной объектной и одной опорной волн, т.е. при двухволновом 2D-взаимодействии. В таком случае коэффициенты $W^{(1)}$ и $W^{(2)}$ зависят не только от поляризационных параметров опорной волны, но и от поляризационных параметров объектной волны.

Степень поляризации опорной волны изменялась с помощью четвертьволновой фазовой пластинки, установленной после светоделительного куба, разделяющего излучение на объектную и опорную волны. Поляризация

объектной волны менялась с помощью второй четвертьволновой пластинки, которая была установлена после светоделительного куба по ходу объектного луча. При этом угол между плоскостью поляризации опорной волны и быстрой осью первой четвертьволновой пластинки изменялся в пределах от 23° до 119° . В свою очередь, угол между плоскостью поляризации объектной волны и быстрой осью второй четвертьволновой пластинки изменялся в пределах от 10 до 112 градусов.

Изменение состояний поляризации объектной и опорной волн, характеризуемых азимутальным углом θ и степенью эллиптичности η (рисунок 1.2), регистрировалось с помощью лазерного поляриметра Thorlabs PAX5710IR2-T. Для этого часть излучения объектной и опорной волн отводилась светоделителями в детектор поляриметра непосредственно перед фоторефрактивным кристаллом.

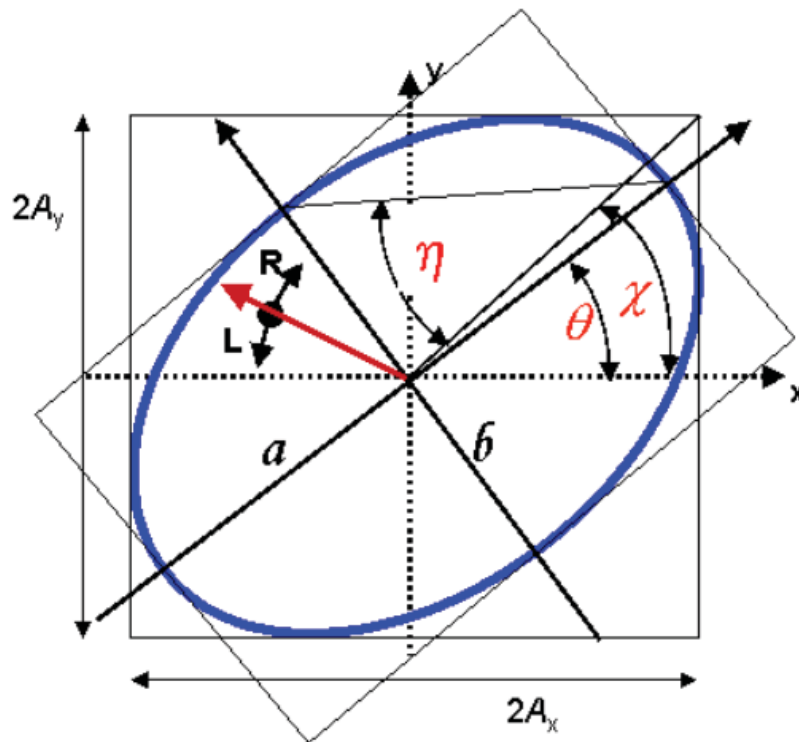


Рисунок 1.2 – Эллипс поляризации: $\eta = \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$ – эллиптичность; θ – азимутальный угол.

На рисунке 1.3 представлена зависимость глубины сигнала демодуляции от углов между плоскостями поляризации опорной и объектной волн и быстрыми осями четвертьволновых пластинок.

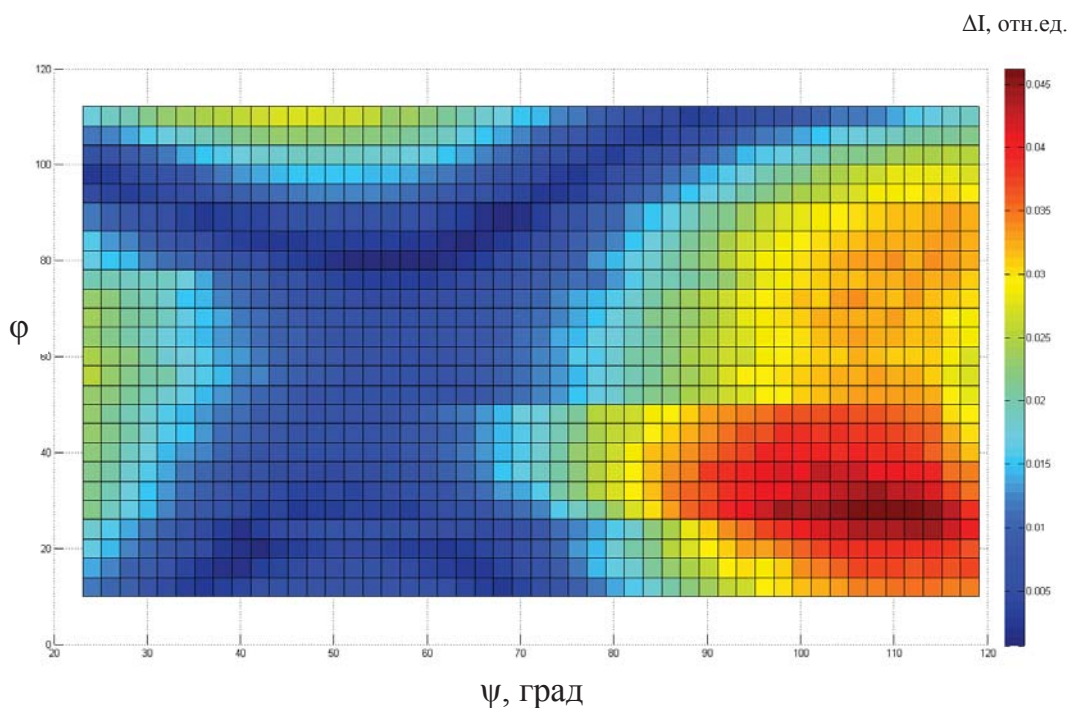


Рисунок 1.3 – Зависимость амплитуды сигнала демодуляции эллиптически поляризованного излучения (ΔI) при его смешении с эллиптически поляризованной опорной волной в фоторефрактивном кристалле в ортогональной геометрии от углов поворота четвертьволновых пластинок: φ – угол между плоскостью поляризации опорной волны и быстрой осью первой четвертьволновой пластинки, ψ – угол между плоскостью поляризации объектной волны и быстрой осью второй четвертьволновой пластинки.

Как видно из рисунка 1.3, максимальная амплитуда демодуляции соответствует углу между плоскостью поляризации опорной волны и быстрой осью первой четвертьволновой пластинки в 107° и между плоскостью поляризации объектной волны и быстрой осью второй четвертьволновой пластинки в 26° , глубина демодуляции сигнала при этом составляет 0.046. Минимальная демодуляция сигнала – 0.001 – достигается соответственно при углах отклонения быстрых осей пластинок на 53° относительно плоскости поляризации опорной волны и на 78° для объектной волны.

Изменение угла между осью поляризации волны и быстрой осью четвертьволновой пластинки меняет параметры поляризации прошедшей через нее волны. Ниже, на рисунках 1.4 и 1.5, представлены зависимости амплитуды

демодуляционного сигнала от параметров поляризации – эллиптичности η и азимутального угла θ – опорной и объектной волн.

На рисунке 1.4 показаны зависимость глубины демодуляции сигнала от изменения эллиптичности η_R и азимутального угла θ_R опорной волны соответствующих максимальному, минимальному и промежуточному значению глубины демодуляции регистрируемого сигнала при постоянных значениях параметров поляризации объектной волны.

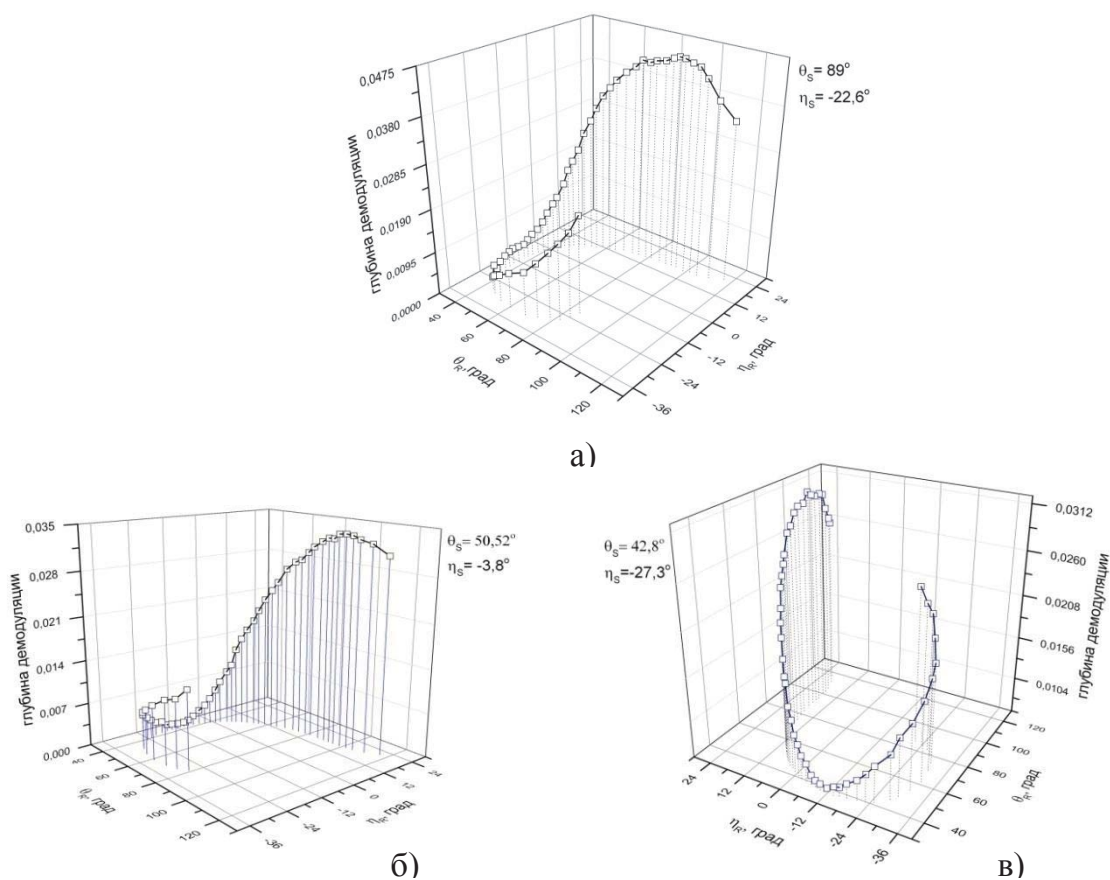


Рисунок 1.4 – Зависимость глубины демодуляции сигнала от изменения эллиптичности η_R и азимутального угла θ_R опорной волны при постоянных значениях параметров поляризации объектной волны.

Рисунок 1.4,а соответствует случаю, когда угол между плоскостью поляризации объектной волны и быстрой осью второй четвертьволновой пластинки достигает 26° , в этом случае при параметрах опорной волны: $\eta_R = 92.48^\circ$ и $\theta_R = 16.57^\circ$ глубин демодуляции регистрируемого сигнала достигает своего максимума. На рисунке 1.4,б – данный угол достигает 78° – при значении

поляризационных параметров опорной волны: $\eta_R = 44.75^\circ$ и $\theta_R = 3.64^\circ$ сигнал становится минимальным и поляризационная независимость интерферометра пропадает. Рисунок 1.4,в – быстрая ось второй четвертьволновой пластинки опережает плоскость поляризации объектной волны на 58° – отображает зависимость значения глубины демодуляции от изменения параметров поляризации опорной волны, при этом глубина демодуляции изменяется в пределах от 0.007 до 0.032, а параметры опорной волны меняются в пределах: $\eta_R = 36.91^\circ - 116.42^\circ$ и $\theta_R = -31.87^\circ - 20.95^\circ$.

На рисунке 1.5 показаны зависимость глубины демодуляции сигнала от изменения эллиптичности η_S и азимутального угла θ_S объектной волны соответствующих максимальному, минимальному и промежуточному значению глубины демодуляции регистрируемого сигнала при постоянных значениях параметров поляризации опорной волны.

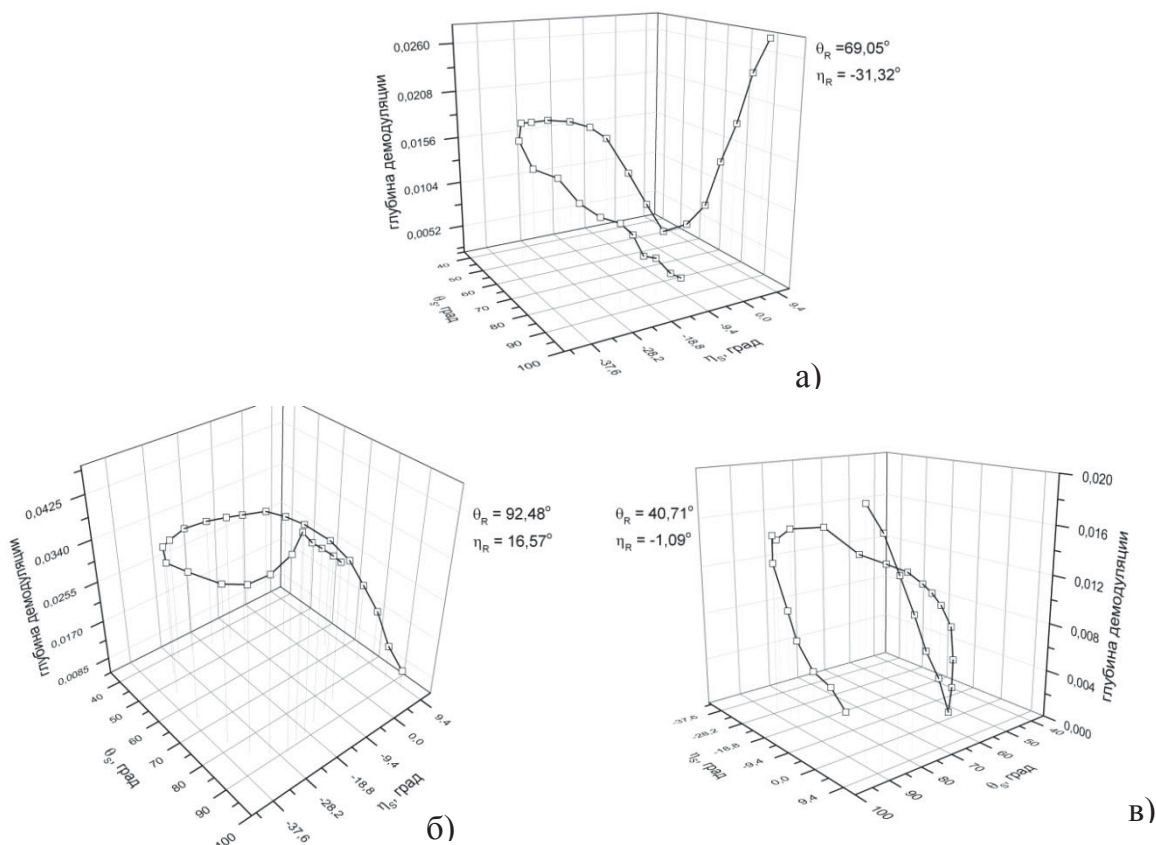


Рисунок 1.5 – Зависимость глубины демодуляции сигнала от изменения эллиптичности η_S и азимутального угла θ_S объектной волны при постоянных значениях параметров поляризации опорной волны;

Рисунок 1.5,а соответствует случаю, когда угол между плоскостью поляризации опорной волны и быстрой осью первой четвертьволновой пластинки достигает 53° , значению максимума соответствуют параметры опорной волны: $\eta_S = 50.5^\circ$ и $\theta_S = -3.8^\circ$. На рисунке 1.5,б – угол между плоскостью поляризации опорной волны и быстрой осью первой четвертьволновой пластинки равен 107° – при значении поляризационных параметров объектной волны: $\eta_S = 92.48^\circ$ и $\theta_S = 16.57^\circ$ сигнал становится минимальным и поляризационная независимость интерферометра пропадает. Рисунок 1.5,в – быстрая ось первой четвертьволновой пластинки отстает от плоскость поляризации опорной волны на 67° – отображает зависимость значения глубины демодуляции от изменения параметров поляризации объектной волны, при этом глубина демодуляции изменяется в пределах от 0.002 до 0.03, а параметры объектной волны меняются в пределах: $\eta_S = 41.79^\circ - 93.01^\circ$ и $\theta_S = -36^\circ - 8.79^\circ$.

Из рисунка 1.5 видно, что сигнал адаптивного интерферометра становится максимальным при углах между быстрой осью первой четвертьволновой пластинки и плоскостью поляризации опорной волны, при которых эллиптичность опорной волны $\eta_R = 92.48^\circ$ и минимальной при углах, соответствующих эллиптичности опорной волны в $45 \pm 0.5^\circ$.

Из определения эллиптичности излучения и дополнительного условия, накладываемого на ортогональные компоненты опорных волн (1.3):

$$\eta = \arctan\left(\frac{b_y}{b_z}\right) = \arctan\left(\frac{c_x}{c_z}\right), \quad (1.5)$$

Таким образом:

$$\frac{b_y}{b_z} = \frac{c_x}{c_z} = \tan \eta. \quad (1.6)$$

Для эллиптичности $\eta_R = 45^\circ$, соотношение ортогональных компонент опорных волн $\frac{b_y}{b_z} = 0.99$, для η_R , равной 92.48° – $\frac{b_y}{b_z} = 0.03$.

В случае использования в адаптивном интерферометре только одной опорной волны, флуктуации состояния поляризации объектной волны приводят к значительным изменениям величины сигнала фазовой демодуляции. Изменения глубины демодуляции сигнала от изменения поляризации объектной волны существенно уменьшаются при применении трехволновой схемы записи динамической голограммы. На рисунке 1.6 изображена зависимость глубины демодуляции сигнала от поворотов объектной и опорной четвертьволновых пластинок в схеме трехволнового взаимодействия. Четвертьволновая пластинка, меняющая параметры поляризации опорных волн, была установлена перед светоделителем, разделяющим опорный пучок на два.

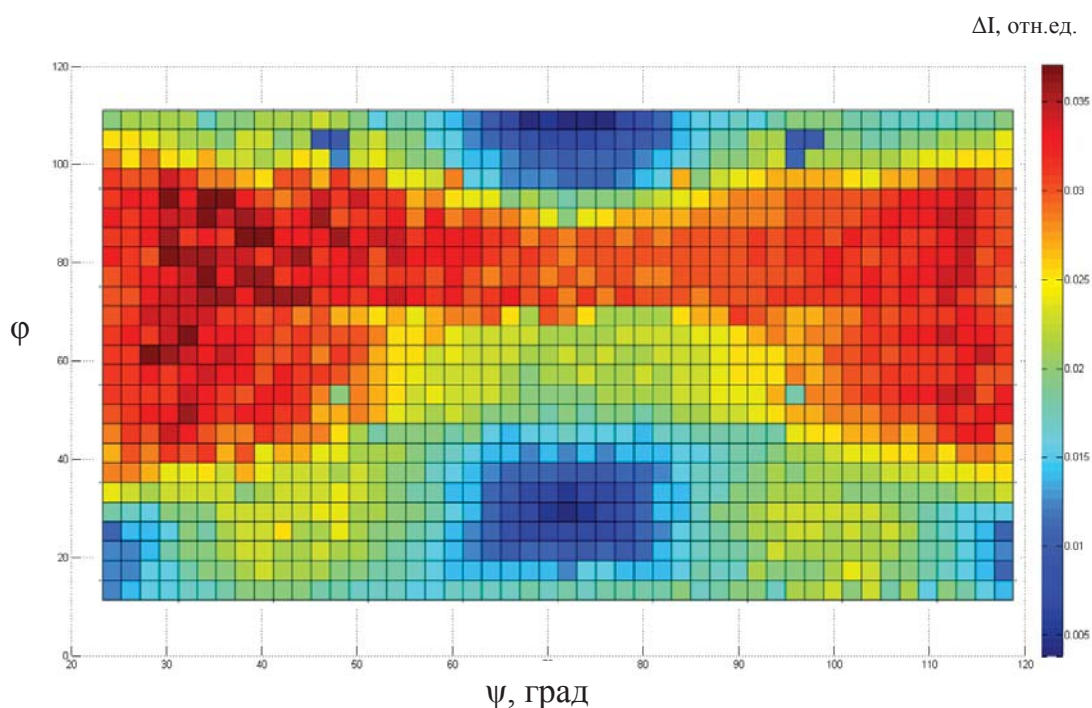


Рисунок 1.6 – Зависимость амплитуды сигнала демодуляции эллиптически поляризованного излучения (ΔI) при его смещении с эллиптически поляризованными опорными волнами в фоторефрактивном кристалле в ортогональной геометрии от углов поворота четвертьволновых пластинок: ϕ – угол поворота четвертьволновой пластинки, меняющей параметры поляризацию опорных лучей, ψ – объектной четвертьволновой пластинки.

Как видно из рисунка 1.6, глубина демодуляции сигнала максимальна при угле между плоскостью поляризации объектной волны и быстрой осью второй

четвертьволновой пластинки $\varphi=86^\circ$ и минимальна при 28° . Установка угла между плоскостью поляризации опорной волны и быстрой осью второй четвертьволновой пластинки $\varphi=84^\circ$ позволяет реализовать режим, близкий к поляризационно-независимому: флуктуации значений глубины модуляции интенсивности объектной волны при изменении ее поляризационного состояния не превышают 18% (минимальное значение глубины модуляции составило 2,8%, максимальное - 3,4%). Таким образом, при переходе от 2D геометрии взаимодействия пучков в ФРК к 3D геометрии, увеличивается стабильность работы интерферометра, вследствие меньшей чувствительности к изменениям поляризационного состояния объектного пучка.

В рамках заключительного этапа НИР проведены эксперименты, направленные на изучение работы систем на основе адаптивных поляризационно-независимых интерферометров при малых интенсивностях излучения опорных и объектного пучков с целью определения предельных значений интенсивности объектного пучка, при которой сохраняется работоспособность системы. Снижение интенсивности объектного лазерного пучка необходимо для обеспечения «щадящего» режима воздействия на исследуемый объект, при котором не допускается деградация, повреждение или значительное нагревание. Снижение интенсивности объектного пучка позволит использовать измерительные системы в биологии, медицине и биоинженерии.

Интенсивность излучения изменялась с помощью переменного светофильтра, установленного перед первым светоделителем. Дополнительно интенсивность излучения объектного пучка изменялась с помощью второго переменного светофильтра, установленного непосредственно перед объектом исследований. Мощность излучения пучков измерялась с помощью измерителей оптической мощности Coherent Field Max II. Для этого часть излучения объектной и опорных волн до их попадания в фоторефрактивный кристалл отводилась на детекторы измерителей мощности. Интенсивность обеих опорных волн изменялась одинаково.

Для вычисления интенсивностей пучков соответствующих зарегистрированным мощностям были определены профили объектного и опорного пучков на входе их в ФРК (рис. 1.7 и 1.8).

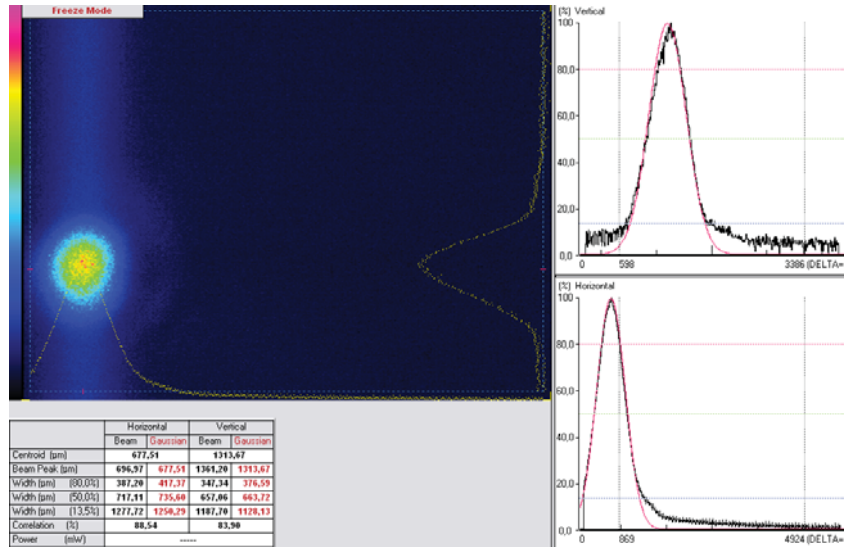


Рисунок 1.7 – Профиль объектного пучка, входящего в фоторефрактивный кристалл

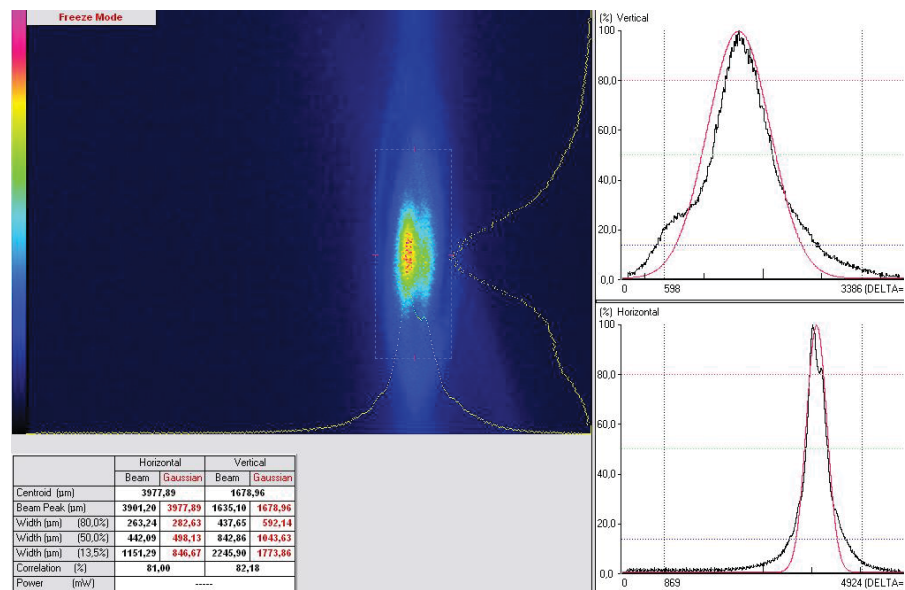


Рисунок 1.8 – Профиль одного из опорных пучка, входящего в фоторефрактивный кристалл

Площади пучков были рассчитаны по уровню $1/e^2$ и составили: $1,42 \text{ мм}^2$ – опорный пучок и $1,01 \text{ мм}^2$ – объектный.

На рисунке 1.9 представлены кривые изменения глубины демодуляции сигнала интерферометра от изменения отношения интенсивности объектного пучка к интенсивности опорного, полученные при различных уровнях интенсивности опорной волны.

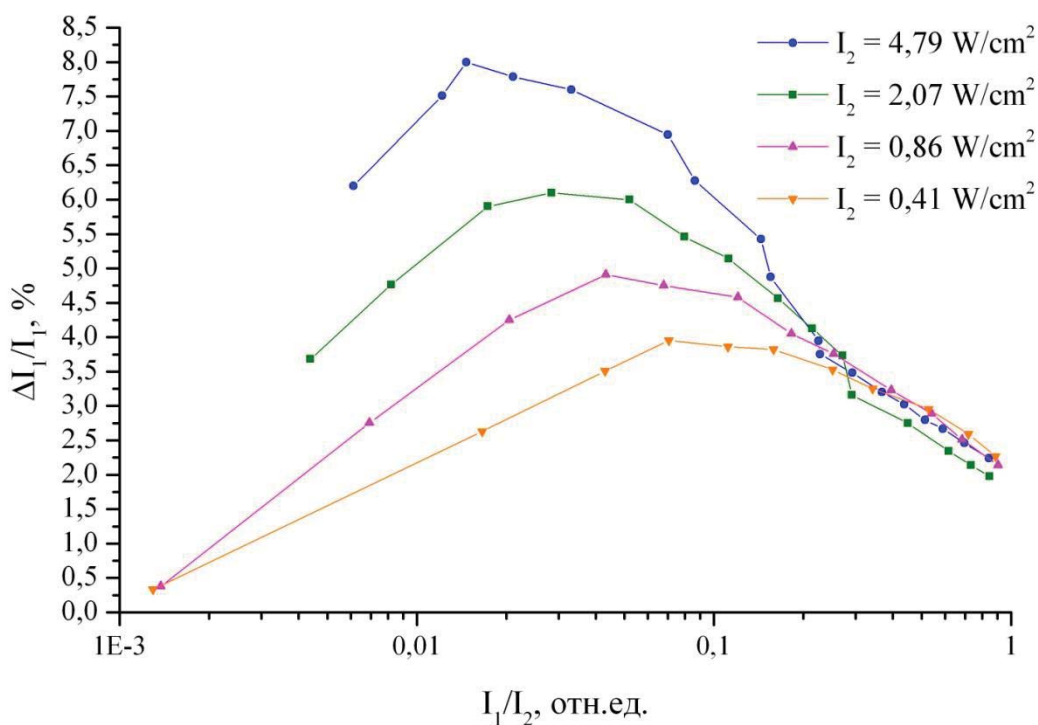


Рисунок 1.9 – Зависимость амплитуды сигнала демодуляции объектной волны от соотношения интенсивностей объектного и опорных пучков при различных уровнях интенсивности опорной волны

Из рисунка 1.7 видно, что при уменьшении общей мощности входящего в интерферометр излучения амплитуда сигнала демодуляции интерферометра изменялась от 8% при интенсивности опорного излучения $I_2=4,8 \text{ Вт/см}^2$, до 4,2% при $I_2=0,4 \text{ Вт/см}^2$. При этом максимальное значение чувствительности с уменьшением интенсивности излучения в опорном пучке достигается при меньшем значении контраста. Так для интенсивности объектного пучка $4,8 \text{ Вт/см}^2$ оптимальное значение контраста составило 1:80; для интенсивности $0,4 \text{ Вт/см}^2$ оптимальное значение контраста составило 1:15, при этом интенсивность объектного пучка составила $0,05 \text{ Вт/см}^2$ и $0,03 \text{ Вт/см}^2$ соответственно. Стоит также отметить, что работоспособность системы сохранялась вплоть до снижения интенсивности объектного пучка до уровня, равного пределу чувствительности фотоприемника ($\approx 3 \times 10^{-5} \text{ Вт/см}^2$).

Полученные результаты позволяют заключить, что максимальное значение чувствительности с уменьшением интенсивности излучения в опорном пучке

достигается при большем значении контраста. Уменьшение мощности входного излучения в 10 раз приводит к снижению демодуляционного сигнала всего в 2 раза. Уменьшение интенсивности позволяет, во-первых, достичь щадящего режима работы системы по отношению к исследуемому объекту (интенсивность объектного пучка снижается в ~ 2 раза), а во-вторых, уменьшить энергозатратности всей системы в целом.

С целью улучшения характеристик многоканальной поляризационно-независимой адаптивной интерферометрической измерительной системы (МАИИС) на основе мультиплексирования ортогональных динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии проведены следующие эксперименты.

Исследовано влияние соотношения интенсивностей опорных и сигнальных световых пучков на уровень чувствительности в отдельно взятом канале при разном количестве одновременно включенных каналов.

С этой целью экспериментальная установка МАИИС была модернизирована в соответствии с рисунком 1.10.

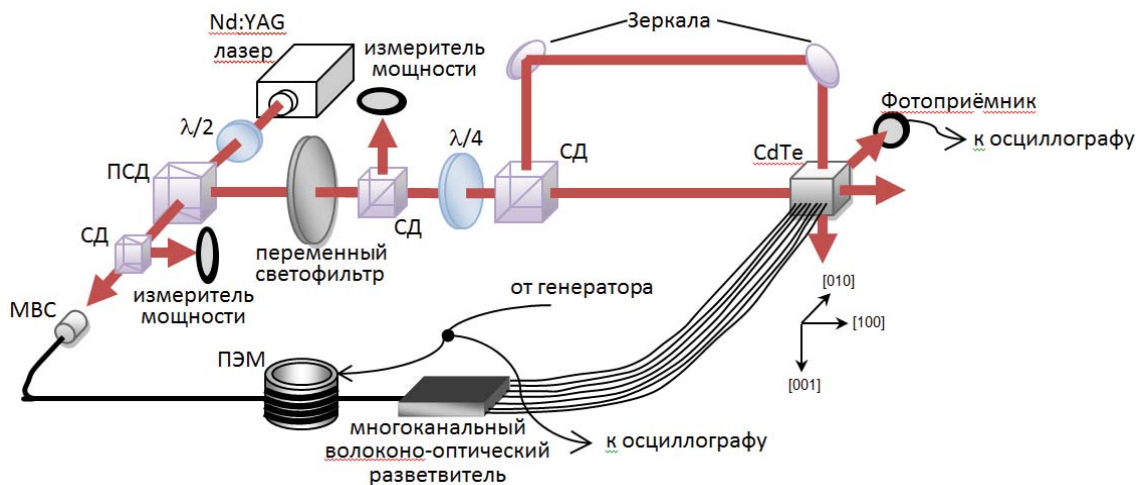


Рисунок 1.10 – Схема экспериментальной установки для определения зависимости чувствительности в канале МАИИС от соотношения интенсивности объектного и суммарной интенсивности опорных световых пучков.

ПСД – поляризационный светоделитель; ПЭМ – пьезоэлектрический модулятор; МВС – многомодовый волоконный световод; СД – светоделитель.

Излучение лазера делилось на два световых пучка при помощи полуволновой фазовой пластинки и поляризационного светоделителя. При этом соотношение мощностей пучков можно было изменять.

Первый пучок – опорный – при помощи светоделителя дополнительно делился на два пучка, которые направлялись в ФРК CdTe вдоль его кристаллографических осей [100] и [010]. В оптический тракт опорного пучка перед светоделителем, был установлен переменный светофильтр, с помощью которого варьировалась его общая интенсивность.

Второй пучок – объектный – дополнительно делился при помощи многомодового волоконно-оптического разветвителя (диаметр сердцевины световодов 62,5 мкм, NA=0,22) на 26 световых пучков примерно одинаковой мощности. Выходные концы многомодовых волоконных световодов (МВС) разветвителя располагались на малом расстоянии к входной грани ФРК (~0,5 мм). Объектные волны, вышедшие из световодов, направлялись в ФРК, где каждая из них формировала канал демодуляции. Интенсивность опорных и объектного пучков перед ФРК контролировалась с помощью двухканального измерителя мощности Newport 2935C.

Модуляция излучения осуществлялась посредством пьезоэлектрического модулятора, установленного перед многомодовым волоконно-оптическим разветвителем. На модулятор с генератора синусоидальных сигналов подавался переменный сигнал, приводившей к модуляции излучения в световоде с амплитудой 0,9 радиан.

В качестве критерия чувствительности используется относительный порог детектирования (ОПД), который является отношением минимальной модуляции фазы, детектируемой адаптивным интерферометром, к минимальной модуляции фазы, которую способен зарегистрировать классический гомодинный интерферометр, не имеющий оптических потерь. В работе [6] было показано, что ОПД может быть экспериментально определен с помощью выражения:

$$\delta_{\text{rel}} = \exp\left(\frac{\alpha L}{2}\right) \frac{P_{D0}}{\Delta P_D} \Phi, \quad (1.7)$$

где Φ – амплитуда модуляции фазы сигнальной волны ($\Phi = 0,9$ рад); α, L – коэффициент поглощения и толщина кристалла, соответственно ($\alpha = 2 \text{ см}^{-1}$; $L = 6$ мм); $P_{D0}, \Delta P_D$ – средняя мощность и амплитуда модуляции мощности объектной волны, дошедшей до фотодетектора соответственно.

В ходе экспериментальных исследований получена серия зависимостей чувствительности в отдельно взятом канале от соотношения интенсивностей объектного и опорных световых пучков при одновременно включенных 1, 5, 10, 20 и 26 каналах. Экспериментальные результаты представлены на рисунке 1.11.

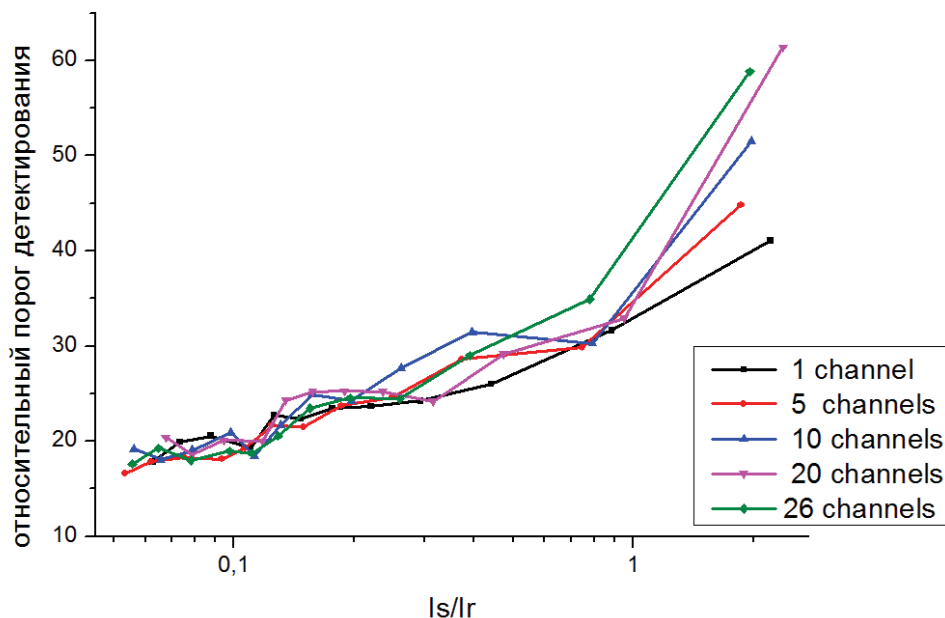


Рисунок 1.11 – Зависимость чувствительности в отдельно взятом канале от соотношения интенсивностей объектного и опорных световых пучков при одновременно включенных: 1, 5, 10, 20 и 26 каналах.

I_s – интенсивность объектного пучка;

I_r – суммарная интенсивность опорных пучков.

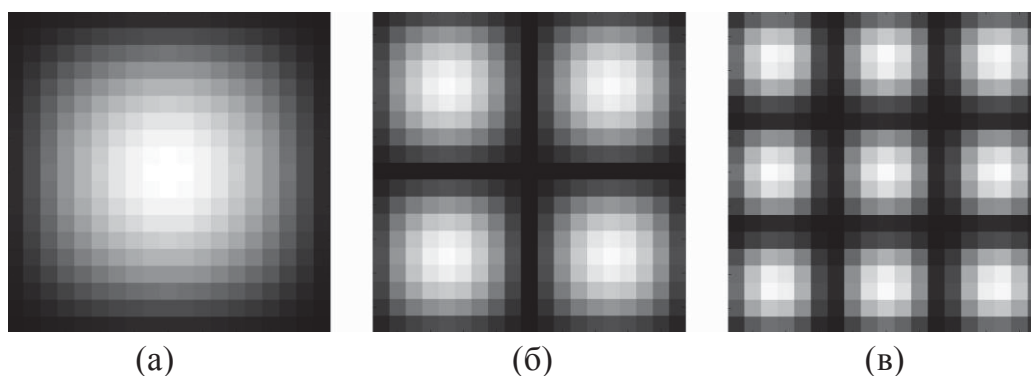
Как видно из рисунка 1.11, включение дополнительных работающих каналов не оказывает заметного влияния на работу отдельно взятого канала. Минимальный

порог детектирования 17 ± 1 достигается при максимальном соотношении интенсивностей объектного и опорный пучков. Однако при отношении интенсивностей менее 0.09 выходной сигнал МАИИС оказался нестабилен. При соотношении интенсивностей пучков, большем 1, наблюдается большой разброс значений ОПД. Разброс связан с большим временем записи голограммы, обусловленным низкой интенсивностью опорных пучков, а также с искажениями профиля голографической решетки, возникающими при высоких значениях контраста интерференционной, что влечет снижение эффективности фазовой демодуляции на формируемых в таких условиях динамических голограммах. Оптимальное соотношение интенсивностей пучков, при котором ОПД достигает минимума (18 ± 3), находится в диапазоне $0.09 \div 0.15$.

При разработке и экспериментальном исследовании функционирования МАИИС в задачах регистрации параметров слабых распределенных вибрационных полей, проводившихся в рамках 2-го этапа настоящей НИР, анализ реконструкции пространственных распределений амплитуды слабых поперечных колебаний упругой мембраны осуществлялся путем их сравнения с распределениями амплитуды поперечных колебаний, рассчитанными теоретически на основе задачи колебания плоской прямоугольной пластины [7]. В ходе экспериментов измерительные линии укладывались в двух направлениях на исследуемую мембрану. Поперечные колебания мембраны приводили к удлинению измерительных линий и появлению на выходе из них сигнала. Полученные результаты сравнения не позволяют в полной мере оценить, насколько прочно линии закреплены на мембране, возникает ли их проскальзывание при колебании мембраны, и достоверен ли сигнал на выходе с них. С целью дополнительной проверки достоверности результатов измерений МАИИС выполнено численное моделирование работы сенсорной части измерительной системы, сравнение его с экспериментальными результатами и теоретическим расчетом с целью проверки, насколько точно измерительные линии повторяют деформации исследуемой поверхности. Тем самым, данное моделирование позволяет определить достоверность сигнала на выходе из измерительных линий. В рамках моделирования рассчитывалось удлинение измерительных линий, жестко закрепленных на исследуемой поверхности, которая совершала поперечные

колебания. На основе удлинений измерительных линий рассчитывался сигнал на выходе из каждой линии.

Моделирование проводилось следующим образом. Были рассчитаны теоретические распределения амплитуды поперечных колебаний на задачи колебания плоской прямоугольной пластины, и представленных в виде матрицы с одинаковым числом строк и столбцов, равным количеству измерительных линий, уложенных в одном из двух направлений сканирования (сканирование по полярному углу с шагом 90 градусов). В среде программирования Matlab разработан алгоритм, который на каждую строку и столбец матрицы "накладывал" измерительную линию и рассчитывал ее удлинение. На основе удлинений измерительных линий рассчитывался сигнал на выходе из каждой линии. Далее полученные сигналы подвергались томографическому восстановлению, результат которого представляет собой распределение амплитуды поперечных колебаний. На рисунке 1.12 представлены распределения амплитуды поперечных колебаний упругой мембраны, рассчитанные теоретически, в сравнении с полученными в результате томографического восстановления с использованием данных численного моделирования, а также результатами томографической реконструкции интегральных данных, экспериментально полученных с реальных измерительных линий, уложенных на упругой мембране.



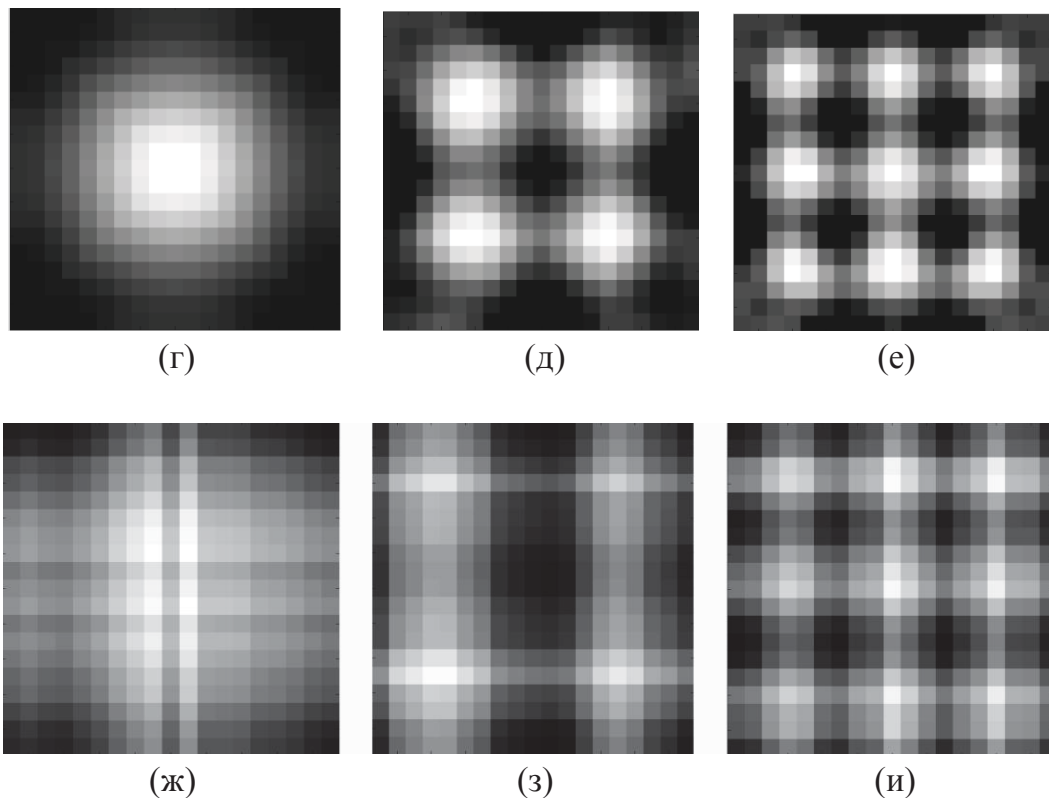


Рисунок 1.12 – Двумерные распределения амплитуды поперечных колебаний упругой мембраны:

а, б, в – теоретически рассчитанные моды 1:1, 2:2 и 3:3 соответственно;

г, д, е – результат томографического восстановления данных, полученных в результате моделирования удлинения измерительных линий, моды 1:1, 2:2 и 3:3 соответственно;

ж, з, и – результат томографической реконструкции данных, экспериментально полученных с реальных измерительных линий, уложенных на упругой мембране, частота колебаний которой составила 54 Гц, 107 Гц и 163 Гц соответственно.

Сравнение результатов численного моделирования с томографическим восстановлением на основе экспериментальных данных, а также с учетом расчета формы колебаний упругой мембраны позволяют заключить, что сенсорная часть МАИИС действительно повторяет форму колебаний исследуемой мембраны, тем самым обеспечивая достоверное томографическое восстановление распределения ее поперечных колебаний. Таким образом, МАИИС может успешно применяться в задачах мониторинга слабых вибрационных полей.

2 Оптимизация схемы поляризационно-независимого адаптивного интерферометра с целью снижения затрат на его изготовление (из отчёта иностранного исполнителя)

В рамках заключительного этапа НИР проведена оптимизация измерительных систем на основе адаптивного голографического интерферометра. Снижение затрат на изготовление может быть достигнуто как за счет замены отдельных элементов устройства на аналоги, стоимость которых ниже, так и за счет оптимизации устройства путем упрощения его схемы.

Предлагаются следующие изменения, позволяющие оптимизировать характеристики измерительных систем при одновременном снижении их стоимости и затрат на их изготовление:

- 1) уменьшение размеров оптомеханических элементов систем;
- 2) переход от регулируемых креплений оптических элементов и сборных стоек к жестко зафиксированным элементам систем, где это возможно и целесообразно;
- 3) оптимизация количества оптомеханических элементов систем;
- 4) применение источников излучения с меньшей мощностью, а, следовательно, меньшей стоимостью;
- 5) замена электронного оборудования на более дешевые аналоги, характеристики которых удовлетворяют требованиям, предъявляемым к оборудованию, используемому в адаптивных измерительных системах.

Все зеркала, линзы и волновые пластины, используемые при изготовлении устройства, имеют диаметр 22,7 мм. Однако на практике используется не вся площадь оптических элементов, так как диаметр опорного лазерного пучка обычно не превышает 2 мм, а объектного – 5 мм. Таким образом, использованием зеркал и оправ меньшего диаметра, например 12,4 мм, может значительно снизить себестоимость устройства. Использование зеркал и линз диаметра меньше 12,4 мм экономически не выгодно ввиду увеличения стоимости прецизионных оправ для линз и зеркал при уменьшении их размеров. Вместо светоделительных пластин целесообразно использовать светоделительные кубы, которые значительно

дешевле, при этом не уступают пластинам по эффективности разделения излучения.

Эффективность использования ключевого элемента поляризационно-независимого адаптивного интерферометра – ФРК – так же можно повысить за счет уменьшения размеров. Предел, до которого можно уменьшить габаритные размеры кристалла, ограничивается размером опорного и объектного пучков. Размер кристалла должен быть больше размера пучков на входе и выходе из кристалла. Минимальный размер грани (высота и ширина кристалла), в которую входит объектный пучок, ограничивается размером объектного пучка на входе в ФРК. Изменение длины кристалла существенно сказывается на глубине модуляции сигнала интерферометра. Как уменьшение, так и увеличение длины кристалла могут приводить к её уменьшению. Уменьшение длины кристалла приводит к уменьшению длины взаимодействия пучков, как следствие к уменьшению глубины модуляции сигнала. Увеличение длины кристалла сопровождается увеличением суммарных потерь излучения вследствие поглощения и рассеивания опорной волны на дефектах в кристалле, что так же приводит к уменьшению глубины модуляции сигнала. Оптимальной длиной кристалла является величина обратно пропорциональна поглощению кристалла α при которой достигается длина взаимодействия, а мощность объектной волны вследствие поглощения уменьшается в 2,7 раз. Для используемого ФРК $\alpha=2,03 \text{ см}^{-1}$, таким образом, оптимальная длина кристалла составляет 4,9 мм.

Часть оптических элементы разработанных измерительных систем установлена на юстируемых опорах и креплениях. Замена юстируемых элементов на неюстируемые в местах, где потребуются их юстировка в процессе сборки или длительной эксплуатации, позволяет значительно удешевить производство измерительных систем (см. таблицу 2.1).

Как было показано в разделе 1, снижение мощности излучения в 10 раз приводит к уменьшению глубины демодуляции сигнала интерферометра всего в 2 раза. В тоже время, уменьшение мощности излучения, входящего в интерферометр, уменьшает риск деградации оптических элементов и объектов, для которых мощное излучение в объектном пучке является деструктивным. Кроме того, применение лазеров с меньшей выходной мощностью излучения существенно

сократит энергозатраты в процессе эксплуатации измерительных систем, а также значительно снизить их стоимость (см. таблицу 2.1).

Оптимизировать оптическую схему ПН адаптивного интерферометра можно следующим образом. Убрать из конструкции зеркало $m1$ (рисунок 2.2), направляющее излучение на микрокантилевер. При этом лазер 3 следует установить так, чтобы излучение попадало непосредственно на светоделитель. Уменьшить количество фокусирующих линз – заменить фокусирующие линзы в опорных пучках и фокусирующую линзу в объектном на единую фокусирующую линзу, установленную между лазером и светоделителем $S1$. Зеркало $m2$ поместить в нерегулируемую оправу, поскольку в юстировке данного оптического элемента нет необходимости. Для юстировки положения объектного пучка достаточно зеркала $m4$. Светоделитель $S2$ следует установить между линзой $L3$ и зеркалом $m4$. При этом из схемы ПН адаптивного интерферометра удаляется вторая четвертьволновая пластина и дополнительные зеркала.

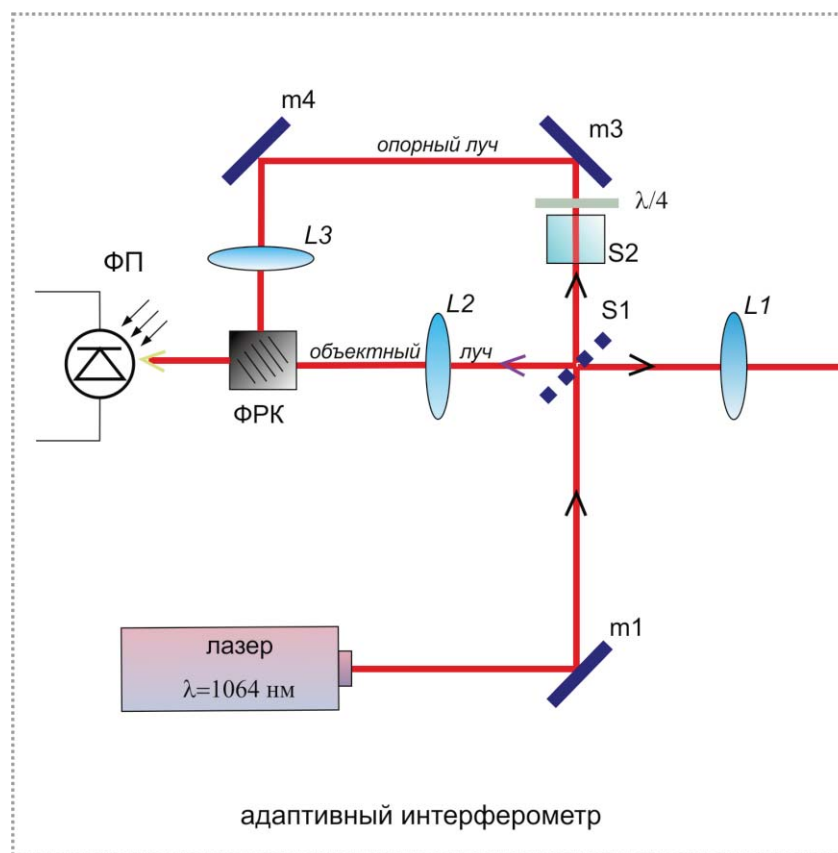


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки. $m1$, $m3$, $m4$ – зеркала; $S1$, $S2$ – светоделитель; $L1$, $L2$, $L3$ – собирающие линзы; $\lambda/4$ – четвертьволновая

пластинка; ФРК – фоторефрактивный кристалл; ФП – фотоприемник; МТ – моторизированный транслятор. Второй опорный луч, образованный светоделителем S2, не показан.

Дополнительно снизить затраты на изготовление измерительных систем можно за счет уменьшения стоимости комплектующих. Во-первых, за счет использования более дешевых аналогов. Для серийного производства измерительных систем на основе ПН адаптивного интерферометра нецелесообразно закупать дорогостоящие иностранные прецизионные комплектующие, гораздо выгоднее использовать отечественные аналоги. Во-вторых, за счет перехода от универсального регистрирующего оборудования, к более простым и дешевым способам обработки сигналов. Например, перейти от универсального многоканального осциллографа к использованию специализированного аналого-цифрового преобразователя и разработке необходимого программного обеспечения, которое не только уменьшит затраты на изготовления, но и позволит упростить схему обработки данных, полученных в ходе исследований.

В таблице 2.1 приведено сравнение стоимости измерительной системы до оптимизации и после.

Таблица 2.1 – Сравнение стоимости до оптимизации и после оптимизации схемы ПН адаптивного интерферометра.

№	До оптимизации		После оптимизации	
	оборудование	Стоимость, руб.	оборудование	Стоимость, руб.
1	ИК лазер Senza-1000 (1064 нм; 1000 мВт) 1 шт.	500000	Лазер Crystal Laser (1064 нм; 50 мВт) 1 шт.	300000
2	Осциллограф Agilent Infiniium DSO9404A 1 шт.	250 000	АЦП Аурис В-422 1 шт.	22 000
3	Оправы юстируемые 1” POLARIS-K1	40 000	Оправы юстируемые 1” POLARIS-K1	15 000

	6 шт.		3 шт.	
4	Оправы не юстируемые 1” Thorlabs FMP1/M 3 шт.	1800	Оправы не юстируемые 1” Thorlabs FMP1/M 6 шт.	3600
2	ФПК CdTe:V (6,6*7*6 мм ³) 1 шт.	50000	ФПК CdTe:V (5*5*5 мм ³) 1 шт.	35000
3	Фотодетектор 1 шт.	10000	Фотодетектор 1 шт.	10000
4	Пластина светоделительная Thorlabs BP245B3 1 шт.	12750	Куб светоделительный BS011 1 шт.	7500
5	Стойки оптические 10 шт.	3000	Стойки оптические 7 шт.	2100
6	Стаканы для оптических стоек 6 шт.	4000	Стаканы для оптических стоек 4 шт.	2500
7	Зеркало 1" PF10-03F01 3 шт.	5200	Зеркало 0,5" ME01G01 2 шт.	3500
8	Линза 1" LA1274 3 шт.	5100	Линза 0,5" LA1074 2 шт	3400
9	Четверть волновая пластина WPDМ05М-532Н-1064Q 2 шт.	34000	Четверть волновая пластина WPDМ05М-532Н-1064Q 2 шт.	17000
10	ИТОГО:	915850	ИТОГО:	421600

Таким образом, как видно из данных, приведенных в таблице 2.1, оптимизация конструкции ПН адаптивного интерферометра позволяет снизить стоимость построенных на его основе систем на 54%.

3 Обобщение и оценка полученных результатов (из отчёта иностранного исполнителя)

3.1 Обобщение результатов исследований

Целью выполнения НИР является разработка принципов создания сверхчувствительных, высокоточных адаптивных измерительных систем на основе использования динамических фоторефрактивных голограмм для решения практических задач нанометрологии, связанных с регистрацией и измерением сверхмалых физических параметров, характеризующих состояние элементов, систем и устройств объектов nanoиндустрии в процессе их создания и эксплуатации. Внедрение результатов позволит модернизировать существующие методы и подходы проведения нанометрологических исследований, а также открыть новые области применения высокоточных прецизионных измерительных систем, расширив тем самым рынок высокотехнологичного научного оборудования, а также услуг, связанных с его производством и внедрением.

Новые характеристики и возможности изделий nanoиндустрии и свойства материалов, создаваемых в результате применения нанотехнологий, предъявляют особые требования к применяемым средствам измерений и их метрологическому обеспечению. Эти средства измерений должны обладать новыми функциональными возможностями, расширенными диапазонами измерений и повышенной точностью. В этой связи требуется модернизация существующего и создание более современного, отвечающего новым задачам поверочного оборудования, а также разработка нормативных документов на методы и средства поверки измерений, применяемых в nanoиндустрии и других областях использования нанотехнологий, и на методики выполнения измерений в связи с развитием нанотехнологий.

Исследование аппаратного обеспечения nanoизмерений ведущих метрологических центров мира позволяет сформулировать ряд принципов, которые должны быть положены в основу создания измерительно-технологического комплекса для обеспечения единства измерений параметров наноструктурированных объектов и материалов:

1. Повышение точности измерений эталонных установок за счет снижения воздействий внешних шумовых полей на прибор путем экранирования внешних полей, стабилизации параметров окружающей среды, создания адаптивных измерительных систем.

2. Повышение точности измерений параметров нанообъектов за счет снижения воздействия окружающей среды на нанообъект путем транспорта его в вакууме и снижения времени между созданием нанообъекта и регистрацией его параметров.

3. Получение информации о свойствах наноструктурированных материалов путем одновременного проведения комбинированных измерений, основанных на различных физических принципах, а также оказания различных видов воздействий в процессе проведения измерений.

4. Для исследования новых свойств наноструктурированных материалов, а также моделирования и создания различных стандартных образцов свойств, состава и структуры в комплекс должны входить установки, позволяющие проводить оперативное изготовление таких образцов.

Можно констатировать, что:

1. Метрологическое обеспечение нанотехнологий должно носить опережающий характер.

2. Метрологическое обеспечение нанотехнологий и нанопродукции – крайне дорогостоящее мероприятие.

3. Доля российского сегмента на международном рынке нанометрологического оборудования незначительна.

4. Переход к нанометрологии потребует значительного увеличения точности применяемых средств измерений (например, точность измерения длины должна возрастать в 10 – 50 раз).

5. Значительно усложняются условия, в которых необходимо будет проводить измерения. Большая часть измерений будет выполняться в условиях высокого вакуума и, как правило, совмещаться с самим технологическим процессом, а также в условиях нестабильности факторов окружающей среды.

6. Потребуется создание новых государственных первичных и рабочих эталонов.

Все выше сказанное свидетельствует о несомненной актуальности исследований, выполняемых в рамках настоящей НИР, направленных на создание нового класса сверхвысокочувствительных и помехоустойчивых систем нанометрологии на основе принципов адаптивной интерферометрии.

В ходе НИР был выполнен аналитический обзор и проведен патентный поиск существующих подходов и методов в построении измерительных систем, применяемых в практических задачах нанометрологии, включая измерение линейных наноперемещений, наноколесаний, профиля поверхности, масс и размеров нанообъектов, параметров слабых электрических и магнитных полей и пр. Анализ современного состояния в указанной области исследований позволил выявить нерешенные проблемы и определить актуальные задачи нанометрологии. Результаты анализа свидетельствуют о перспективности выбранного подхода в создании нового класса ультрачувствительных помехоустойчивых систем нанометрологии на основе ПН адаптивных интерферометров. Обзор выявил практическое отсутствие данных по созданию ПН адаптивных интерферометров, что свидетельствует о несомненной новизне выбранного направления и позволит в дальнейшем обеспечить приоритет в данной области на мировом уровне.

В последнее время для получения более полной информации о нанообъектах появилось множество новых методов исследования, сочетающих преимущества различных традиционных методик, например, лазерной интерферометрии, спектроскопии и т.д. В частности, лазерные измерительные технологии находят широкое применение в задачах современной нанометрологии, а методы оптической интерферометрии рассматриваются как одни из наиболее чувствительных для регистрации сверхмалых физических величин [8]. Это обусловлено тем, что интерференционная картина содержит в себе полную информацию об оптических свойствах объекта. Тем не менее, интерферометрические ИС в силу своей рекордно высокой чувствительности оказываются в значительной степени подверженными влиянию внешних факторов, как-то: флуктуации температуры, атмосферного давления, случайных механических воздействий и пр.

Аналитический обзор существующих методик стабилизации работы интерферометрических измерительных систем [9-11] показал, что наиболее простой и эффективной является методика, заключающаяся в построении

интерферометрической ИС на основе голограммы и создании условий, при которых последняя могла бы автоматически изменяться (перезаписываться) вслед за неконтролируемыми параметрами окружающей среды, исключая тем самым их влияние на результаты измерений, то есть в использовании адаптивных голографических интерферометров. Голографический принцип объединения волн в кристалле позволяет обеспечить точное согласование сложных волновых фронтов опорного и зондирующего световых пучков, а адаптивные свойства динамической голограммы обеспечивают выполнение и поддержание квадратурных условий, соответствующих максимальной чувствительности интерферометра, стабилизацию рабочей точки интерферометра в условиях неконтролируемых изменений параметров окружающей среды. Благодаря этому повышается стабильность интерферометра, уменьшаются шумы, увеличивается чувствительность, и появляется возможность использовать в качестве объектов исследования диффузно-рассеивающие объекты, а также объекты, характерные размеры которых меньше размера зондирующего лазерного пучка в месте максимальной фокусировки или даже длины волны излучения.

В ходе теоретического и экспериментального анализа эффективности работы адаптивного интерферометра с использованием различных геометрий записи голограмм в ФРК показано, что ортогональная геометрия является наиболее эффективной. На первом этапе НИР была предложена новая геометрия ортогонального трёхволнового 3D-взаимодействия в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии. Теоретически показано и экспериментально обосновано, что на основе диффузионных голограмм, формируемых в ФРК в ортогональной геометрии трёхволнового взаимодействия, может быть создана эффективная адаптивная интерферометрическая измерительная система. Как было показано в работе [5], динамическая голограмма, формируемая в ортогональной геометрии, становится поляризационно-селективным элементом, применение которого в адаптивном интерферометре позволяет обеспечить линейный режим фазовой демодуляции полностью деполаризованной объектной волны, что в свою очередь снимает необходимость использования в схеме адаптивного интерферометра поляризационных фильтров для выделения необходимого состояния поляризации и позволяет использовать в качестве объектных волн излучение с произвольным

состоянием поляризации, в том числе, с нестабильными параметрами. Устранение поляризаторов позволяет существенно снизить оптические потери в адаптивном интерферометре, а также снизить поляризационный шум (ПШ), связанный с флуктуациями средней интенсивности поляризационно-модулированной волны объектной волны (или волны с нестабильной поляризацией), прошедшей через поляризационный фильтр.

В ходе НИР были выполнены приоритетные исследования векторного взаимодействия волн в ортогональной геометрии. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что в схеме трёхволнового взаимодействия объектного пучка с двумя опорными, распространяющимися во взаимно ортогональных направлениях в ФРК кубической симметрии вдоль его основных кристаллографических осей [100], [010] и [001], в последнем формируется три динамических голограммы, дифракция волн на которых в соответствие носит анизотропный характер. При этом сигнал демодуляции фазы объектной волны $\Delta_1(\varphi)$ формируется в результате некогерентного сложения двух составляющих $\Delta_{12}(\varphi)$ и $\Delta_{13}(\varphi)$, полученных при попарном взаимодействии объектной волны с каждой из опорных. Показано, что если опорные волны имеют эллиптическую поляризацию с одинаковым направлением вращения, то указанные сигналы складываются. Определены условия, накладываемые на значения поляризационных компонент амплитуд опорных волн при удовлетворении которых, суммарный сигнал демодуляции оказывается независимым от состояния поляризации объектной волны и определяется только её интенсивностью.

Выполнено экспериментальное исследование процессов фазовой демодуляции излучения с разным поляризационным и модовым составом в адаптивном интерферометре на основе динамических голограмм, сформированных в геометрии трёхволнового ортогонального взаимодействия в ФРК кубической симметрии $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (группа симметрии 23) и CdTe (группа симметрии 43m) на длинах волн 532 и 1064 нм. Показано, что динамическая голограмма, сформированная в геометрии трёхволнового ортогонального взаимодействия с использованием двух эллиптически поляризованных волн, отношение поляризационных компонент которых составляет 0,03, способна обеспечить устойчивую поляризационно-независимую демодуляцию фазы световой волны.

В ходе теоретического исследования, проводимого в рамках 1-го этапа НИР, показано, что на основе ортогональной геометрии формирования динамических голограмм могут быть созданы многоканальные адаптивные измерительные системы, причем ортогональная геометрия формирования голограмм способна обеспечить повышение эффективности этих систем с точки зрения снижения уровня перекрестных шумов, повышения предела мультиплексирования без снижения чувствительности в отдельном канале и упрощения технической реализации голографических каналов демодуляции в ФРК.

Разработан принцип мультиплексирования ортогональных динамических голограмм в ФРК кубической симметрии, в рамках которого N деполяризованных объектных световых пучков распространяются в кристалле вдоль направления $[100]$, где взаимодействуют с двумя опорными эллиптически поляризованными пучками, распространяющимися под углом в 90 градусов к объектным в направлениях $[010]$ и $[001]$. Теоретически показано, что в ортогональной геометрии в силу анизотропии электрооптического эффекта оказывается запрещенным взаимодействие объектных световых пучков между собой в случае, если они распространяются строго в направлении $[100]$, или если имеет место зеркальная симметрия их распространения относительно оси $[001]$, что исключает возможность появления перекрестных помех между каналами.

Экспериментально показано, что в ортогональной геометрии мультиплексирования динамических голограмм уровень перекрестных помех остается ниже уровня собственных шумов отдельного канала даже в случае полного взаимного перекрытия световых полей отдельных каналов. При этом такая геометрия позволяет обеспечить дополнительное снижение уровня перекрестных шумов между каналами без потери пороговой чувствительности в канале за счет пространственного разнесения объектных световых пучков в кристалле. Установлено, что при использовании должным образом сфокусированных объектных пучков с диаметром поперечного сечения $0,5$ мм в кристалле с размером входной грани 6×6 мм² может быть сформировано свыше 140 полностью независимых голографических каналов демодуляции фазы. При условии же полного перекрытия объектных световых пучков в кристалле при допущении увеличения относительного порога детектирования в отдельном канале на 10% в

одном кристалле может быть сформировано до 10^4 голографических каналов демодуляции.

В рамках 1-го этапа НИР была практически реализована и экспериментально исследована работа 6-ти канального адаптивного волоконно-оптического интерферометра, в котором в качестве сенсоров использовались стандартные МВС ($NA = 0.22$; диаметр сердцевины 62.5 мкм), а динамические голограммы формировались в кристалле CdTe в диффузионном режиме в геометрии ортогонального трехволнового взаимодействия. На основе Фурье-анализа полученных сигналов демодуляции показано, что в спектре каждого канала содержится только одна компонента, соответствующая его рабочей частоте модуляции. Установлено, что перекрестные шумы между каналами интерферометра не связаны с взаимодействием волн в фоторефрактивном кристалле и не превышают уровня 1% от основного сигнала в канале (либо не детектируется вовсе), что служит экспериментальным подтверждением независимости работы каналов.

Таким образом, результаты, полученные в ходе НИР, позволяют заключить, что измерительные системы, в том числе и многоканальные, на основе адаптивных поляризационно-независимых голографических интерферометров являются перспективным направлением развития сверхчувствительных нанометрологических систем.

Большой интерес вызывают системы для регистрации наномасштабных перемещений и колебаний, так как помимо нанометровых смещений они позволяют определять параметры нанообъектов. Определение геометрических параметров нанообъектов является одним из перспективных направлений развития современной нанометрологии, что обусловлено самим определением нанотехнологий. Под нанотехнологиями в настоящее время подразумевается:

- 1) знание и управление процессами в масштабе нанометра (но не исключаящее масштаб менее 100 нанометров) в одном или более измерениях, когда ввод в действие размерного эффекта (явления) приводит к возможности новых применений;

- 2) использование свойств объектов и материалов в нанометровом масштабе, которые отличаются от свойств свободных атомов или молекул, а также от

объемных свойств вещества, состоящего из этих атомов или молекул, для создания более совершенных материалов, приборов, систем, реализующих эти новые свойства. Отсюда логически вытекает необходимость метрологического обеспечения прежде всего линейных измерений в нанометровом диапазоне [8].

При создании современных конструкционных материалов используются методы и объекты нанотехнологии, которые оперируют со структурами, имеющими линейные размеры, лежащие в нанодиапазоне. По этой причине на всех этапах формирования наноструктур должна быть предусмотрена возможность контроля их параметров с предельной точностью до 1 нм, а при создании и эксплуатации объектов, созданных с использованием результатов нанотехнологической деятельности, контроль параметров промышленных объектов и обнаружение дефектов также должны осуществляться с такой же точностью.

Решение проблемы суперпрецизионных измерений геометрических параметров наноструктур и наноперемещений открывает путь к технологиям XXI века, базирующимся на манипулировании отдельными атомами вещества. В первую очередь, это интегральная микроэлектроника, где уменьшение характерного размера одного элемента микросхемы в n раз ведет к возрастанию ее информационной емкости в n^5 - n^6 крат. Суперпрецизионное позиционирование, обеспечиваемое суперпрецизионным измерением перемещений, позволит довести характеристический размер элемента до 5 – 10 нм, что обеспечит создание интегральных схем сверхбольшой концентрации и сверхвысокого быстродействия на основе разнообразных эффектов туннелирования. Во-вторых, это геновая инженерия, где поатомное манипулирование хромосомным набором путем измерения и управления прецизионным перемещением с заданной точностью наноманипулятора лежит в основе методов клонирования, генных методов трансплантологии, фармакологии, вирусологии и др. Метрологическое обеспечение суперпрецизионного позиционирования позволяет сделать прорыв по точности в оборонной, аэрокосмической, автомобильной, атомной промышленности, материаловедении, машино- и приборостроении, других отраслях промышленности, имеющих прямое отношение к национальной безопасности страны.

В рамках 2-го этапа НИР был разработан и изготовлен экспериментальный макет измерительной системы на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра, оптимизированного для регистрации и измерения наномасштабных перемещений и колебаний макро- и микрообъектов. В качестве тестовых микрообъектов были использованы волоконные световоды с диаметром поперечного сечения от 0.3 до 147 мкм, а также микрокантилеверы шириной 42 мкм.

Выполнены экспериментальные исследования функционирования системы регистрации наноперемещений и нанокосебаний на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра. Определены рабочие характеристики системы, а также критерии ее применимости для регистрации перемещений. Установлено, что в режиме регистрации перемещений работа измерительной системы определяется соотношением скорости перемещения и некоторой характерной скорости системы V_0 , определяемой временем записи динамической голограммы в кристалле, которая составила 2.2 мкм/с (при интенсивности излучения в кристалле 16 Вт/см² и длине волны 1064 нм). Показано, что наиболее устойчивая работа измерительной системы обеспечивается при измерении перемещений со скоростями близкими или превышающими V_0 . При этом минимальный порог детектирования перемещений, определяемый чувствительностью системы и уровнем шумов, составил: в режиме регистрации медленных перемещений (при скоростях меньше характерной) - 1.9 нм; в режиме регистрации перемещений со скоростями близкими к характерной - 1.7 нм; в режиме регистрации быстрых перемещений (при скоростях больше характерной) - 1.6 нм. Динамический диапазон измерений наноперемещений 42 дБ. Чувствительность измерительной системы в режиме регистрации нанокосебаний составила 1.8×10^{-7} нм(Вт/Гц)^{1/2}. При этом показано, что разработанная система способна осуществлять измерения колебаний объектов с размерами меньше 1 мкм.

В работе определены оптимальные параметры формы объектного пучка интерферометра, позволяющие обеспечить наиболее эффективный контроль перемещений и колебаний микромасштабных объектов. Установлено, что наибольшая чувствительность измерительной системы достигается при применении для формирования объектного пучка длиннофокусных

цилиндрических линз (при которых отношение размера фокального пятна к характерному размеру объекта ~ 3), либо короткофокусных сферических линз (при которых отношение размера фокального пятна к характерному размеру объекта ≤ 1). Показано, что при использовании сферических линз с увеличением фокусного расстояния растет диапазон допустимых положений объекта в окрестности фокальной плоскости объектного пучка и может достигать 20 мм (при $f=35$ мм). В свою очередь, при использовании цилиндрических линз диапазон допустимых перемещений объекта слабо зависит от фокусного расстояния линзы.

Также в рамках 2-го этапа НИР при непосредственном участии финских коллег разработан экспериментальный макет многоканальной поляризационно-независимой адаптивной интерферометрической измерительной системы на основе мультиплексирования ортогональных динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии, оптимизированной для регистрации параметров слабых динамических полей. Для исследования таких полей был использован томографический метод регистрации данных. Преимущество этого подхода заключается в том, что при регистрации параметров вибрационных полей требуется гораздо меньшее количество сенсоров по сравнению системами, основанными на сосредоточенных измерительных элементах. В качестве чувствительных элементов МВС (диаметр сердцевины 62.5 мкм, $NA=0.22$). Реализована система с 26-ю каналами. Проведены экспериментальные исследования функционирования многоканальной адаптивной интерферометрической измерительной системы в задачах регистрации параметров слабых распределенных вибрационных полей и в задачах регистрации и реконструкции параметров слабых поперечных колебаний упругих поверхностей. Данные, полученные с помощью МАИИС, позволили восстановить пространственные распределения амплитуды слабых поперечных колебаний упругой мембраны.

Результаты исследования МАИИС позволили определить рабочие характеристики системы. Определена чувствительность системы, эквивалентная порогу детектирования перемещений поверхности, которая составила $(0.97 \pm 0.3) \times 10^{-6}$ нм(Вт/Гц)^{1/2} на канал. Установлено, что разработанная МАИИС способна обеспечить регистрацию и восстановление пространственных

распределений вибрационных полей с амплитудой от 2.2 мкм до 110 мкм с пространственным разрешением 1.3 см^{-1} . Выполнено сравнение экспериментальных данных, полученных с помощью МАИИС, с данными, рассчитанными теоретически на основе апробированных физико-математических моделей. Значения коэффициентов корреляции между экспериментальными и расчетными распределениями находятся в пределах от 0.76 до 0.87, что служит подтверждением достоверности полученных результатов. Финские коллеги приняли непосредственное участие в создании макета многоканальной поляризации-независимой адаптивной интерферометрической измерительной системы для регистрации параметров слабых вибрационных полей, а также косвенное – при создании макета адаптивной системы регистрации и измерения наномасштабных перемещений и колебаний макро- и микрообъектов, включая подготовку конструкторской документации.

Измерение сверхмалых масс является еще одной важной задачей при исследовании нано- и микромасштабных объектов [12-17]. В частности, такие объекты могут служить чувствительными элементами для измерения различных физических величин: температуры, давления и других. Так по изменению массы нано- и микрообъектов можно судить о химических или биологических процессах протекающих на их поверхности. Понимание того, как структурирован материал на наноуровне, какова масса и удельная поверхность составляющих частиц, дает возможность контролировать свойства и проектировать новые устройства, схемы и даже системы [14-16]. На сегодняшний день довольно остро очерчена проблема экспресс измерений массы наночастиц при промышленном производстве нанопорошков для контроля качества и стандартизации выпускаемой продукции, актуальными являются задачи молекулярной биологии при определении массы вирусов, белков, антител, которые характеризуются близкими к наночастицам параметрами.

Существует множество подходов к измерению масс микро- и наночастиц, но все они сводятся к трем основным способам измерения массы: путем определения отношения массы (чаще, отношения массы к заряду m/z) и относительного количества ионов, получаемых при ионизации исследуемого вещества или уже присутствующих в изучаемой смеси (масс-спектрометрия); путем исследования

отклонения отраженного луча от объекта, на который осаждается исследуемое вещество (оптические масс-сенсоры); путем исследования частоты собственных колебаний самих микрообъектов, либо колебательных систем, к которым эти микрообъекты присоединятся (резонансное микровзвешивание). В ходе теоретических исследований, проведенных в рамках настоящей НИР, было установлено, что самыми оптимальными с точки зрения высокой чувствительности и простоты измерения являются измерительные системы, основанные на резонансном микровзвешивании. Среди методик регистрации смещения кантилеверов или изменения их резонансной частоты неразрушающие методы лазерного контроля считаются наиболее распространенными и удобными, так как позволяют дистанционно осуществлять измерение вибраций при исследовании наномасштабных объектов. И только они достаточно чувствительны и дают относительно стабильный сигнал.

В рамках третьего этапа НИР был создан экспериментальный макет измерительной системы на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра для измерения сверхмалых масс микро- и нанообъектов, включая наночастицы. В качестве чувствительного элемента измерительной системы использовались кремниевые кантилеверы прямоугольной формы толщиной 11.5 мкм, длиной 170 мкм, шириной 42 мкм. Возбуждение собственных колебаний кантилеверов осуществлялось оптическим методом с помощью импульсного лазера с длительностью импульса 7 нс и длиной волны излучения 532 нм. Установлено, что наиболее эффективное возбуждение собственных колебаний кантилеверов указанных размеров достигается при энергии импульса 0.5 мДж. Проведены экспериментальные исследования функционирования интерферометрической системы для измерения сверхмалых масс. Экспериментально определена толщина тонкой золотой пленки, образованной на кантилевере в вакуумной камере, посредством измерения смещения частоты собственных колебаний кантилевера. Толщина пленки составила 32 нм, масса 3.1 нг, что хорошо согласуется с толщиной пленки измеренной в сканирующем электронном микроскопе, которая составила 25 ± 8 нм. Для апробации работы измерительной системы в задаче измерения масс микро и нанообъектов на кантилеверы помещались частицы золота с диаметром от 40 до 300 нм, после чего кантилеверы устанавливались в измерительную систему.

Каждый лазерный импульс, возбуждающий колебания, приводил к отсоединению от кантилевера некоторого количества частиц, что приводило к соответствующему изменению частоты колебаний. Чувствительность измерительной системы составила 1.7×10^{12} Гц/г, порог детектирования 8.5×10^{-12} г. Также в рамках данного этапа НИР была выполнена оптимизация параметров кантилевера, выполняющего функцию чувствительного элемента интерферометра, с целью детектирования объектов массой порядка 10^{-14} г. Экспериментально продемонстрирована возможность устойчивой регистрации колебаний осцилляторов с характерным размером порядка 300 нм в системе для измерения сверхмалых масс на основе ПН адаптивного интерферометра. Показано, что с использованием кантилеверов размером $20 \times 0.3 \times 0.3$ мкм³ можно уменьшить порог детектирования до 10^{-16} г.

Важной задачей современной нанометрологии является также задача детектирования и измерения слабых электромагнитных полей. Актуальность решения данной задачи в первую очередь лежит в устранении нежелательных наводок и в обнаружения магнитных аномалий. Помимо того, системы регистрации малых магнитных и электрических полей находят применения и в других сферах человеческой деятельности: в медицине (магнитоэнцефалография, магнитогастрография, магнитный маркерный мониторинг, исследование сердца), геологии (геофизическая разведка) и, конечно же, в исследованиях, связанных с применением ядерного магнитного резонанса. На данный момент достаточно методика обнаружения малых магнитных и электрических полей – бесконтактная, основанная на применении волоконно-оптических сенсоров. Бесконтактные измерения электрических токов легко осуществляются детектированием магнитных полей, порожденных этими токами. Существуют различные механизмы преобразования магнитного поля в изменения параметров световой волны, распространяющейся по волокну. Один из самых распространенных механизмов преобразования заключается в изменении поляризации излучения посредством эффекта Фарадея. В рамках 3-го этапа НИР совместно с финскими коллегами был разработан экспериментальный макет измерительной волоконно-оптической системы на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра для измерения слабых электрических и магнитных полей. Основной принцип работы системы заключается в преобразовании переменного магнитного поля в фазовую

модуляцию излучения, проходящего по многомодовому волоконному световоду, с помощью магниточувствительного кантилевера с прикрепленным на его свободном конце постоянным магнитом и участком многомодового волоконного световода, также прикрепленного к кантилеверу. Фазовая модуляция излучения в многомодовом волоконном световоде, вызванная колебанием кантилевера, детектируется при помощи поляризационно-независимого адаптивного голографического интерферометра, в котором применяется векторное смещение волн в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии CdTe:V в ортогональной геометрии записи динамической голограммы. В ходе экспериментальных исследований обнаружено, что наибольшая чувствительность измерительной системы достигается в том случае, когда волоконный световод находится в состоянии статического натяжения. Показано, что при оптимальной силе натяжения световода 7 Н чувствительность волоконно-оптической измерительной системы составляет 0.28 дБ/мкТл . Установлено, что при проектировании сенсора необходимо учитывать резонансный характер кантилевера, поскольку чувствительность сенсора существенно зависит от соотношения частоты детектируемого сигнала $F_{\text{раб}}$ и резонансной частоты кантилевера $F_{\text{рез}}$. Показано, что при отношении частот $F_{\text{рез}}/F_{\text{раб}}=1.19$ чувствительность сенсора составляет 0.28 дБ/мкТл , а динамический диапазон - 11 дБ . При отношении $F_{\text{рез}}/F_{\text{раб}}=2.56$ чувствительность снижается до 0.16 дБ/мкТл , а динамический диапазон - до 6.3 дБ . Однако при увеличении чувствительности сенсора снижается стабильность его работы. Для сенсора, расположенного на расстоянии 1.5 см от источника магнитных полей порог детектирования тока составил 30 мА . В случае если расстояние между сенсором источником магнитных полей уменьшается до 1.5 мм , порог детектирования тока составит 0.03 мА .

Результаты проведенных НИР могут быть использованы для проведения опытно-конструкторских работ, направленных на создание систем контроля параметров/состояния микро- и нано-электромеханических систем (MEMS / NEMS), систем контроля параметров/состояния макромасштабных объектов с субнанометровым разрешением, детекторов наномасштабных объектов, детекторов сверхслабых динамических физических величин и полей, в т.ч. характеризующихся кратким проявлением на длительных временных интервалах (ждущие детекторы),

детекторов сверхслабых физических полей (в т.ч. акустических, гидроакустических, электрических, магнитных, гравитационных), систем высокоразрешающего лазерно-ультразвукового исследования структуры технических и биологических объектов, а также медицинских исследованиях.

Разработка экспериментальных макетов разработанных нанометрологических систем осуществлялась в соответствии со следующими основными документами по развитию нанотехнологий и нанометрологии в РФ: «Программа координации работ в области нанотехнологий и наноматериалов в РФ» и «План действий по стимулированию развития nanoиндустрии».

Конечным продуктом, создаваемым с использованием результатов проекта, являются физические принципы и схемы организации адаптивных поляризационно-независимых интерферометрических систем регистрации и измерения нано- и субнанометровых (до 0.001 нм) перемещений и колебаний элементов нанопозиционеров, зондов, микрокантиллеров, измерения сверхмалых масс нанообъектов (до 10^{-14} г), измерения параметров слабых силовых физических полей (акустических, электрических, магнитных), характеризующих состояние макро- и микрообъектов, включая элементы систем nanoиндустрии.

3.2 Сопоставление анализа научно-информационных источников и результатов теоретических и экспериментальных исследований и оценка эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем

Развитие нанотехнологии, широкое внедрение ее достижений в науку, технику, производство, обеспечение качества продукции немислимы без опережающего развития методов и средств измерений [8]. Проведенный аналитический обзор научно-информационных источников и сравнение характеристик работы разработанных в ходе НИР измерительных систем с существующими аналогами показал, что разработанные системы могут составить достойную конкуренцию существующим системам на мировом рынке нанометрологии и нанотехнологий. Более того, разработанные системы способны вывести процесс нанометрологических исследований на качественно новый уровень в силу своей адаптивности. В первую очередь, это касается систем

измерения наномасштабных перемещений и вибрационных колебаний. Важность данных систем связана с тем, что столь бурное развитие индустрии микромеханических устройств привело к росту спроса на измерители малых перемещений и виброметры нанометрового диапазона. Особый интерес вызывают устройства для оптического детектирования быстрого смещения поверхности тестируемого объекта и для определения степени износа металлических конструкций. Это же оборудование необходимо во многих отраслях науки, в частности при диагностике композитных материалов, в микробиологии для изучения сложных временных процессов, происходящих в ходе клеточного жизненного цикла. Перечисленные выше задачи не ограничивают круг применимости метрологических систем линейных измерений. В неявном виде применение подобных систем требуется в подавляющем большинстве методов и средств обеспечения единства измерений других параметров и свойств нанообъектов, например, для решения задачи точного позиционирования зонда измерительного устройства в требуемое место съема измерительной информации. Тем не менее, техника для измерения нано- и микромасштабных смещений и амплитуд вибрационных колебаний практически отсутствует.

Как показал обзор научно-информационных источников и анализ российского рынка измерительных систем [18], наиболее конкурентно способным российским аналогом разработанной в ходе настоящей НИР системы регистрации наномасштабных перемещений и колебаний микро- и макрообъектов является "Лазерный измеритель интерференционный наноперемещений" (ЛИИН) [19], разработанный в ОАО «Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума» (ОАО «НИЦПВ») в 2006 году. В реальных задачах для регистрации нано- и микроперемещений и геометрических параметров объектов ЛИИН применяются в совокупности с растровыми электронными (РЭМ) и сканирующими зондовыми (СЗМ) микроскопами, расположенными у потребителя. Для обеспечения единства измерений необходимо проводить калибровку этих сложных измерительных устройств по эталонным образцам — мерам малой длины, выполненным в виде рельефных шаговых структур с заданными шириной, высотой (глубиной) и формой профиля.

Принцип работы ЛИИН основывается на методах лазерной интерферометрии - фазометрии, опирающихся на фундаментальные константы и эталоны физических величин [18, 19]. Измеритель сверхмалых линейных перемещений построен на гетеродинном способе измерений с двухчастотным преобразованием частоты лазерного излучения с помощью акустооптического эффекта и фазовой обработкой измерительной информации в радиочастотном диапазоне. В основу работы ИС положено сравнение измеряемого изменения длины оптического пути с высокостабильной мерой — длиной волны излучения частотно-стабилизированного He–Ne-лазера. Сравнение осуществляется при помощи двухлучевого лазерного гетеродинного интерферометра, в котором производится преобразование и модуляция оптического излучения, формирование опорного и измерительного каналов и последующее совмещение излучения на смесительном элементе. Преобразование частоты излучения стабилизированного одночастотного He–Ne-лазера осуществляется с использованием акустооптических модуляторов. Последующее выделение информационного сигнала осуществляется на разностной радиочастоте в фотоприёмном устройстве. Обработка полученной информации производится в специализированной электронно-фазометрической системе (ЭФС). Измерение проводится относительно сигнала разностной частоты и опорного сигнала той же радиочастоты, формируемого в ЭФС, сопряженной с персональным компьютером. Полученная информация при этом выражается через длину волны излучения или непосредственно с ней связанной величиной, называемой углом фазового сдвига [20]. Измеритель сверхмалых линейных перемещений обеспечивает работу в режиме измерений перемещений в реальном масштабе времени путем счета фазовых циклов ($2\pi N$, где N — целое число циклов) и дробных долей полос интерференции (в диапазоне $0-2\pi$) так называемых углов фазового сдвига, нормируемых в долях или единицах длины волны стабилизированного одночастотного He–Ne-лазера.

Основные метрологические характеристики ЛИИН: диапазон измерений линейных перемещений составляет 1 нм – 10 мм, дискретность отсчета 0.1 нм, абсолютная погрешность измерений 0.5 нм, максимальное значение измеряемой скорости перемещения объекта 3мм/с.

На мировом рынке нанотехнологий и приборов для проведения исследований нанопроцессов представлены следующие аналоги измерителя динамических наноперемещени.

Адаптивный интерферометрический приемник IOS AIR-1550-TWM, разработанный компанией Intelligent Optical Systems, США в 2010 году [21]. IOS AIR представляет собой лазерный ультразвуковой регистратор вибрационных смещений, работающий на длине волны 1550 нм. Данный регистратор основан на возбуждении ультразвуковой волны в исследуемом объекте. По изменениям продольных, поперечных, поверхностных и объемных волн регистрируется смещение объекта. Порог детектирования рассмотренной системы достигает 4×10^{-7} нм $(\text{Вт/Гц})^{1/2}$ при полосе детектирования 125 МГц.

Адаптивные интерферометрические приемники, разработанные в компании Bossa Nova Technologies (BNT), США, 2005 год: TEMPO, QUATRO [22]. Приемники TEMPO позволяют зарегистрировать субмикометровые смещения и вибрационные колебания частотой до 1 ГГц объектов со диффузно-рассеивающей поверхностью. Основанные на двухволновом взаимодействии опорных и объектных волн в фоторефрактивном кристалле, TEMPO могут работать с излучением, полученным на выходе волоконных световодов. Большая апертура (~50 мм) позволяет подводить большую оптическую мощность к изучаемым объектам, что позволяет существенно увеличить чувствительность измерительной системы. Преимуществом данных датчиков является возможность работы в режиме реального времени – выходной сигнал строго пропорционален реальному смещению поверхности. Приемник QUATRO был специально разработан для неразрушающего лазерного контроля в промышленных условиях. Основанный на гомодинном квадратурном интерферометре, QUATRO способен дистанционно регистрировать субнанометровые смещения макрообъектов. Использование схемы демодуляции сигнала «случайными квадратурами» позволяет существенно увеличить чувствительность измерительных систем и использовать в приемниках QUATRO излучение, выходящее из многомодового волоконного световода. BNT реализовала многоканальную измерительную систему на основе приемника QUATRO, которая является эквивалентом нескольких квадратурных гомодинных интерферометров. Существенным недостатком приемников QUATRO является

необходимость дополнительных электронных систем стабилизации работы интерферометров. Основные метрологические характеристики приемников TEMPO и QUATRO представлены в сравнительной таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные аналоги технологии измерителя динамических наноперемещений

Измерительная система	Диапазон измерений	Порог детектирования	Полоса детектирования	Мощность источника	Адаптивность
Адаптивная система регистрации наномасштабных перемещений	0.5 – 266 нм	1.8×10^{-7} нм(Вт/Гц) ^{1/2}	2 кГц – 1ГГц	20 мВт	есть
ЛИИН	1 нм – 10 мм	$< 10^{-3}$ нм	-	Не менее 0.25 мВт	-
AIR-1550-TWM, США	-	4×10^{-7} нм(Вт/Гц) ^{1/2}	125 МГц	60 мВт	-
Bossa Nova TEMPO 1D, США	-	10×10^{-7} нм(Вт/Гц) ^{1/2}	100кГц – 1МГц	150-500 мВт	есть
Bossa Nova QUARTET, США	-	2×10^{-7} нм(Вт/Гц) ^{1/2}	20кГц– 20МГц	150-1000 мВт	-

Разработанные в рамках НИР адаптивный регистратор наноперемещений МАИИС позволяют регистрировать перемещения поверхностей на расстояния от нескольких нанометров до сотен микрон с чувствительностью до 0.97×10^{-6} нм(Вт/Гц)^{1/2} (МАИИС) либо 1.8×10^{-7} нм(Вт/Гц)^{1/2} (адаптивный регистратор наноперемещений). Ключевым отличием, как видно из таблицы 3.1, разработанной нанометрологической системы регистрации наномасштабных линейных и вибрационных перемещений является сочетание высокой чувствительности и адаптивности, что делает разработанную систему не только конкурентоспособной на внутреннем рынке нанотехнологий, но и позволяет составить достойную конкуренцию зарубежным аналогам.

Измерение сверхмалых масс является важной задачей при исследовании нано- и микромасштабных объектов [12-17]. Так по изменению массы нано- и микрообъектов можно судить о химических или биологических процессах протекающих на их поверхности. Понимание того, как структурирован материал на наноуровне, какова масса и удельная поверхность составляющих частиц, дает возможность контролировать свойства и проектировать новые устройства, схемы и даже системы [14-16]. В рамках НИР разработана система на основе адаптивного ПН интерферометра для регистрации сверхмалых масс, технические характеристики которой приведены в сравнительной таблице 3.2.

Как показал обзор научно-информационных источников и анализ международного и российского рынков измерительных систем для регистрации сверхмалых масс [12, 23-28], несмотря на множество конкурентоспособных аналогичных систем, прямых аналогов разработанной системе в мире и в России нет. В первую очередь это объясняется выпускаемой приборной базой, т.к. многие зарубежные и российские производители в течение 10-15 лет выпускают зондовые и атомно-силовые микроскопы (АСМ), и, следовательно, системы ультрапрецизионного взвешивания являются совместимыми модулями к ним, либо построены на платформах АСМ. Также стоит отметить, что детектирование колебаний в микрокантилеверных системах взвешивания осуществляется, как правило, оптическими методами, основанными на измерении отклонения луча, отраженного от поверхности зонда. Использование интерферометрической адаптивной системы является новизной данного проекта и ни у одного аналога измерительной системы не используется.

Ближайшими аналогами данной разрабатываемой измерительной системы являются ультрапрецизионные системы взвешивания отдельных микрочастиц, бактерий и вирусов на базе микрокантилеверных датчиков, используемых в атомно-силовой микроскопии. Основными разработчиками данных систем являются компании: NT-MDT (Россия) – сенсоры на основе комбинации АСМ и пьезокварцевых микровесов «ПКМ» [29]; Академия биосенсоров (Россия) – ультрапрецизионные системы микровзвешивания «Атомные весы Унилаб», (Россия) и «Атомные весы Биоскан» [30]. Одним из главных преимуществ данных систем является то, что они позволяют измерять массы частиц с достаточно

высокой точностью, не требуя для этого флуоресцентной или радиоактивной маркировки частиц.

Лидером российского рынка нанотехнологии на данный момент является продукция компании «Академия биосенсоров» в силу их высокой чувствительности и простоты использования. Конструктивно «Атомные весы» представляют оптическую систему слежения за отклонениями микрокантилеверного сенсора - микромеханического преобразователя химических и биологических процессов, протекающих на его поверхности, в физический отклик. Система разработана на базе микрокантилеверных датчиков, применяющихся в атомно-силовой микроскопии. Каждая микроконсоль отклоняется в соответствии с величиной изменения поверхностной энергии рецептора, что позволяет выполнять масштабирование и распараллеливание измерительной системы [31]. Для регистрации сверхмалых масс в «Атомных весах» используют микроконсоли, противоположные стороны которых выполнены из разных материалов. В данном случае, одна из сторон консоли покрыта золотой пленкой. За счет того, что один конец кантилевера жестко закреплен, а другой может свободно передвигаться, кантилевер способен прогибаться под действием очень малых сил при напылении или удалении сверхмалых масс вещества на его поверхности. Изгиб происходит в результате изменений латеральных сил в поверхностном слое, связанных с селективной сорбцией анализируемого вещества на поверхности кантилевера. Чувствительность по массе микроконсоли достигает порядка 10^{-19} г, что позволяет регистрировать с достаточной точностью аттограммы вещества, напыленного на консоль [32]. Величина изгиба кантилевера измеряется лазерной детектирующей системой. Малость размеров микроконсоли и его собственной массы позволяет исследовать с его помощью сорбционные свойства отдельных микро- и даже наночастиц. Одновременно можно проводить анализ одной пробы на содержание в ней нескольких веществ, используя массив кантилеверов, модифицированных различными рецепторными слоями. Одним из главных недостатков устройства по сравнению с разработанной в рамках НИР – это большое время отклика (3-15 минут после появления вещества), которое не позволяет производить измерения в режиме «реального времени». Стандартные оптические методы плохо подходят для оптимальных решений современных задач,

таких как быстрое и синхронное детектирование отклонений на массивах кантилеверов (атомные весы). Более того, размер лазерного пятна в большинстве коммерчески доступных оптических системах составляет несколько микрометров, следовательно, ими трудно детектировать изменения в структурах субмикронных размеров.

Пьезокварцевые микровесы, реализованные в приборах серии ПКМ, позволяют решить многие проблемы современной нанометрологии, такие как изучение вязкоупругих свойств тонких пленок, изучение процессов сорбции/десорбции сенсорных материалов, изучение динамики биоповерхностей, изучение вязкости и плотности жидкости, изучение трибологических свойств материалов, изучение самоорганизующихся слоев и т.д. Наиболее чувствительными и прецизионными в серии являются пьезокварцевые микровесы с контролем диссипации энергии – ПКМ-Д. Принцип действия ПКМ-Д основан на анализе изменения частоты и добротности колебаний кварцевого резонатора. Поперечные колебания резонатора возбуждаются переменным напряжением, приложенным к двум электродам, нанесенным на кварцевую пластину. Пьезоэлектрические методы регистрации изменения частоты позволяют достичь чувствительности измерительной системы в 175 Гц/пг за счет увеличения жесткости кантилеверов [33]. Пьезоэлектрический датчик способен обнаруживать смещения во всех направлениях, в зависимости от пьезоэлектрических коэффициентов данного материала. Однако в масштабах измерительных систем, когда толщина кантилеверов редко превышает несколько микрон, пьезокварцевый метод может стать разрушающим и сократить срок эксплуатации микровесов. Комбинацией пьезокварцевых микровесов с АСМ этой проблемы можно избежать, но, в таком случае, система значительно усложнится и подорожает.

В отличие от приборов российских разработчиков, зарубежные аналоги ориентированы на решение фундаментальных научных задач и предназначаются сугубо для научно-исследовательских лабораторий, а не для массового производства. Ближайшие зарубежные аналоги - это микрокантилеверные системы продукты фирм Cantion (Дания) и Concentris (Швейцария) [34, 35].

Высокопрецизионные микрокантилеверные сенсоры, выпускаемые корпорацией Concentris с 2003 года, являются полными аналогами российских

«Атомных весов» для анализа веществ и массы частиц в газовой среде (Cantisens CSR-801G) и в жидкостной среде (Cantisens CSR-801). Сенсоры, выпускаемые компанией Cantion, Дания, (системы прямого анализа веществ и массы частиц CantiLabPro и CantiLab3D) отличаются от продукции Concentris геометрией чувствительных микроконсолей. В отличие от капиллярных консолей Cantisens сенсоры CantiLab основаны на споттерах, способных регистрировать капли жидкости в несколько пиколитров. Основные нанометрологические и технологические характеристики рассмотренных аналогов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Основные аналоги технологии измерителя сверхмалых масс

Наименование измерительной системы	Порог детектирования, г	Точность измерений	Режимы измерений	Количество каналов	Агрегатные состояния среды исследования	Адаптивность
Адаптивная система регистрации и сверхмалых масс	10^{-16}		статический, динамический	До 26	Твердые частицы в контролируемой атмосфере, Тонкие пленки, Жидкости	есть
«Атомные весы»	10^{-12}	5%	статический, динамический	1	Твердые частицы в контролируемой атмосфере, Тонкие пленки, Жидкости	—
ПКМ-Д	3×10^{-10}	10^{-10} г	статический, динамический	4	Твердые частицы в контролируемой атмосфере, Тонкие пленки, Жидкости	—
			статический		Твердые	

Cantisens CSR-801G	10^{-14}	10^{-14} г	й, динамический	8	частицы в контролируе мой атмосфере, Тонкие пленки	—
Cantisens CSR-801	10^{-12}	10^{-14} г	статически й, динамический	8	Жидкость (белки, вирусы)	—
CantiLabPro	10^{-14}	10^{-16} г	статически й, динамический	8	Жидкость (белки, вирусы)	—
CantiLab3D	10^{-18}	10^{-18} г	статически й, динамический	2	Твердые частицы в контролируе мой атмосфере, Тонкие пленки, Жидкости	—

Уникальность системы, разработанной в ходе выполнения настоящей НИР, состоит в том, что устройство для «взвешивания» наночастиц, молекул, вирусов может быть интегрировано с высокоразрешающим интерферометрическим ближнепольным оптическим микроскопом, что принципиально расширяет круг научно-исследовательских задач. Принципиально, вещество и его свойства можно исследовать как в жидкостной фазе, так и в твердотельной, в динамическом режиме обработки сигнала. С помощью микровесов можно зарегистрировать изменение массы на подложке или изменение свойств прикрепленной к подложке пленки, поддерживать необходимый газовый состав в камере, температуру и т.д. За счет сочетания высокой чувствительности и адаптивности разработанная система может применяться как в лабораторных исследованиях, так и в промышленных нанотехнологиях контроля масс и выращивания биологических культур. Проектная технология создания приборов для измерения сверхмалых масс (адаптивная интерферометрическая измерительная система сверхмалых масс) является конкурентоспособной на современном рынке аналитического

оборудования, и может быть использована для решения широкого круга научно-исследовательских задач.

Бесконтактные и высокочувствительные измерения токов в линиях электропередач являются важной задачей, способствующей избеганию опасных наводок от электрических напряжений и магнитных полей. Эту задачу можно решить, используя волоконно-оптические сенсоры. Бесконтактные измерения электрических токов легко осуществлять детектированием магнитных полей, порожденных этими токами.

Аналитический обзор научно-информационных источников и изучение сегмента рынка нанотехнологий и приборов для проведения исследований нанопроцессов, посвященного дистанционному измерению слабых полей и токов, показал, что прямых аналогов разрабатываемой модели измерительного прибора на мировом рынке нет. Это объясняется тем, что, как правило, вне лабораторий измерения слабых электрических и магнитных полей осуществляется специализированными пикоамперметрами и магнитометрами. Большинство аналогов разработанной системы ориентированы на решение фундаментальных научных задач и предназначаются сугубо для научно-исследовательских лабораторий, а не для массового производства. Однако существует множество различных механизмов преобразования магнитного поля в изменения параметров световой волны, распространяющейся по волокну. Один из самых распространенных механизмов преобразования заключается в изменении поляризации излучения посредством эффекта Фарадея. Эффект Фарадея применен в нескольких оптических сенсорах [36-38], но эти сенсоры продолжают находиться в стадии разработки. Наиболее близким аналогом разработанной системы на мировом рынке являются системы СКВИД – «сверхпроводящие квантовые интерферометры» – сверхчувствительные магнитометры, используемые для измерения очень слабых магнитных полей [39]. СКВИД-магнитометры обладают рекордно высокой чувствительностью, достигающей $5 \cdot 10^{-33}$ Дж/Гц (чувствительность по магнитному полю — 10^{-13} Тл). Простейший СКВИД представляет собой сверхпроводящее кольцо с двумя джозефсоновскими туннельными контактами [40, 41]. Это в определенном смысле аналог оптического эффекта с интерференцией от двух щелей, только в данном случае интерферируют

не световые волны, а два джозефсоновских тока, при этом интерференция проявляется как зависимость критического тока СКВИДа от приложенного внешнего магнитного поля.

Различают два типа СКВИД — СКВИД на постоянном токе (двухконтактный СКВИД) и высокочастотный СКВИД (одноконтактный СКВИД). СКВИД на постоянном токе был изобретен в 1964 году физиками Robert Jaklevic, John J. Lambe, James Mercereau, и Arnold Silver. Они же вместе с Джеймсом Эдвардом Циммерманом изобрели СКВИД на переменном токе.

СКВИД на переменном токе функционально ближе к разработанной системе. Работа СКВИДа на переменном токе основана на нестационарном эффекте Джозефсона и использует только один джозефсоновский контакт. ВЧ-СКВИД в измерительной технике демонстрирует обычно более высокую чувствительность за счет более высокой трансформации потока от измерительного объёма (образца). Он дешевле и проще в производстве в малых количествах. Значительная часть экспериментов в фундаментальной физике и измерений в биомагнетизме, включая измерение сверхмалых сигналов, были выполнены с использованием СКВИД на переменном токе.

Основные технические характеристики СКВИД на переменном токе: чувствительность системы достигает 5×10^{-33} Дж/Гц, минимальное детектируемое магнитное поле — 10^{-13} Тл, но в отдельных образцах достигает 5×10^{-18} Тл. Так как СКВИД в конечном счете является электронной системой, ее существенным недостатком является малая помехозащищенность и подверженность влиянию внешних наведенных полей, что делает невозможным ее применение без дополнительных стабилизирующих устройств вне лаборатории.

Чувствительность разработанной волоконно-оптической измерительной системы составляет 0.28 дБ/мкТл, минимально детектируемое магнитное поле — 5×10^{-6} Тл, а динамический диапазон — 11 дБ при соотношении частоты детектируемого сигнала $F_{\text{раб}}$ и резонансной частоты кантилевера $F_{\text{рез}}$: $F_{\text{рез}}/F_{\text{раб}}=1.19$, а при отношении $F_{\text{рез}}/F_{\text{раб}}=2.56$ чувствительность снижается до 0.16 дБ/мкТл и динамический диапазон до 6.3 дБ. Несомненным преимуществом системы является ее адаптивность, позволяющая использовать систему не только в рамках научных исследований, но и для нанометрологического технического контроля. Кроме того,

система обладает значительным потенциалом увеличения чувствительности регистрации магнитного поля при использовании магниточувствительных кантилеверов микромасштабных размеров.

Таким образом, полученные в ходе выполнения НИР результаты позволяют заключить, что проектные технологии создания приборов на основе поляризационно-независимых адаптивных интерферометров для исследования и контроля параметров наномасштабных объектов и характеризующих их полей является конкурентоспособными на современном рынке аналитического оборудования. Коммерческие перспективы проекта зависят от состояния и тенденций развития рынков, на которые будут ориентированы технологии создания приборов.

4 Разработка рекомендаций по использованию результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках (из отчёта иностранного исполнителя)

В настоящее время широко исследуются и внедряются методы интерферометрии-фазометрии нано-, микро- и миллиметрового диапазона перемещений. В частности, перспективными измерителями наноперемещений являются бесконтактные оптические методы лазерной интерферометрии, обеспечивающие высокую чувствительность ($<10^{-3}$ нм) к смещению объекта, линейность в широком динамическом диапазоне, высокую локальность, абсолютный характер калибровки измерений в долях длины волны лазерного излучения, возможность автоматизации получения и обработки измерительной информации.

Для измерения перемещений существуют методы классической и голографической интерферометрии, спекл-интерферометрии, спекл-фотографии, фотоупругости, муара, проекции полос. При рассмотрении метрологического обеспечения существующих оптических методов по измерению деформационных перемещений выявлено, что они обладают недостаточным порогом чувствительности, в них не в полной мере рассмотрены вопросы о диапазоне измеряемых величин, точности измерений. Сдерживающим фактором применения данных методов в промышленности явились нерешенные вопросы, связанные с выделением малых перемещений на фоне больших перемещений объекта как целого, влияния вибраций на элементы экспериментальных установок.

Дальнейшее совершенствование данных методов в направлении в области расшифровки интерферограмм, метрологическом и техническом обеспечении привело к созданию новых методов, таких как: метод высокочувствительной голографической интерферометрии, метод муаровых полос, контактная спекл-интерферометрия, высокочувствительный метод панорамной голографической интерферометрии, метод панорамной спекл-интерферометрии

Анализ вышеприведенных методов показал, что на момент постановки задачи данной НИР в применении когерентно-оптических методов для регистрации

параметров слабых распределенных вибрационных полей, перемещений и колебаний поверхности объекта отмечались некоторые проблемы, к ним относятся:

- влияние вибраций на стабильность элементов голографической схемы;
- расширение диапазонов измерения перемещений точек поверхностей исследуемых деформируемых тел;
- ослабление требований к технологическому процессу регистрации изображения на голограмме и его восстановлению;
- уменьшение материальных затрат и трудоемкости при изготовлении элементной базы интерферометра вследствие существенного ее упрощения;
- устранение влияния голограмм на прогиб тонкостенных конструкций при нахождении малых деформационных перемещений на фоне больших смещений объекта как жесткого тела;
- решение вибрационных и динамических задач с достаточно высокой степенью точности;
- увеличение степени автоматизации процесса расшифровки интерферограмм и отображения результатов измерения деформационных параметров.

Решение данных проблем связано с созданием поляризационно-независимого адаптивного интерферометра, поиска оптимальных путей сбора, хранения и обработки информации, рациональной организации эксперимента, позволяющие устранить их недостатки и расширить круг решаемых ими задач.

Оптические интерферометры на основе использования динамических фоторефрактивных голограмм предназначены для решения практических задач нанометрологии. Использование динамической голограммы позволяет не только демодулировать фазовые изменения сигнала интерферометра, но и эффективно стабилизировать его благодаря тому, что динамическая голограмма постоянно перезаписывается в кристалле, подстраиваясь тем самым под медленные изменения сигнала, вызванные неконтролируемыми воздействиями внешних факторов (дрейф температуры, давления, случайные механические воздействия, промышленные вибрации и пр.) Таким образом, измерительная система, построенная на основе динамических фоторефрактивных голограмм, приобретает адаптивные свойства, что обеспечивает ее высокую помехозащищенность и, как следствие, устойчивое

детектирование слабых воздействий в реальных условиях. Поэтому работы, выполненные в ходе настоящей НИР, являются актуальными в научной и прикладной сфере их применения.

Потенциальное промышленное применение адаптивной интерферометрической измерительной системы (измеритель динамических наноперемещений, колебаний) довольно широко. Рекомендации по использованию сверхчувствительного адаптивного интерферометра для нанометрологии. «(измеритель динамических наноперемещений и колебаний, слабых электрических и магнитных полей») основаны на современных проблемах и задачах науки и производства, а именно:

- При создании современных конструкционных материалов используются методы и объекты нанотехнологии, которые оперируют со структурами, имеющими линейные размеры, лежащие в нанометровом диапазоне. По этой причине на всех этапах формирования наноструктур должна быть предусмотрена возможность контроля их параметров с предельной точностью до 1 нм, а при создании и эксплуатации промышленных объектов, использующих результаты нанотехнологической деятельности, контроль параметров промышленных объектов и обнаружение дефектов также должны осуществляться с такой же точностью. При этом техника для микроизмерений динамических процессов сверхмалых амплитуд практически отсутствует. Таким образом, задача создания методов и аппаратуры прецизионной микропрофилометрии и микровиброметрии является актуальной.
- Бурное развитие индустрии микромеханических устройств привело к спросу на измерители малых перемещений и микровиброметры нанометрового диапазона, например таких как оптическое детектирование быстрого смещения поверхности тестируемого объекта, определение степени износа металлических конструкций.
- На современном этапе развития науки и техники при расчете прочности, ресурса и работоспособности любой конструкции основное внимание уделяется рассмотрению ее напряженно-деформированного состояния (НДС). Напряжения в исследуемых телах определяются в настоящее время косвенным способом на основе нахождения перемещений точек поверхности данных тел.

По этой причине измерение перемещений точек поверхности деформируемых тел является основным звеном при анализе НДС конструкций.

- Автомобильная промышленность - вибрационная и прочностная доводка двигателя, трансмиссии, силового каркаса, кузова, а также их элементов, снижение шума.
- Турбостроение - анализ прочности и вибрационный анализ, неразрушающий контроль дисков и лопаток турбин и компрессоров.
- Аэрокосмическая промышленность - анализ деформаций узлов и деталей летательных аппаратов при статических, вибрационных, ударных, тепловых воздействиях, при нагружении внутренним давлением; выявление дефектов в узлах из композитных материалов.
- Производство звуковоспроизводящей техники и музыкальных инструментов - оптимизация амплитудно-частотных характеристик динамических головок, акустических систем, улучшение звучания музыкальных инструментов.

Это же оборудование необходимо во многих отраслях науки, в частности при диагностике композитных материалов, в микробиологии для изучения сложных временных процессов, происходящих в ходе клеточного жизненного цикла. Но этим обстоятельством роль нанометрологии линейных измерений не исчерпывается. Она присутствует в неявном виде в подавляющем большинстве методов и средств обеспечения единства измерений других параметров и свойств нанообъектов. Например, для решения задачи точного позиционирования зонда измерительного устройства в требуемое место съема измерительной информации. При этом диапазон сканирования по каждой координате может простирается от единиц нанометров до сотен микрометров, а требуемая точность выставления координаты составлять десятые доли нанометра. Поэтому в нанометрологии проблеме реализации наношкалы в нанометровом и прилегающем к нему диапазоне уделяется огромное внимание. Одним из перспективных решений проблемы является создание и внедрение в практику технической диагностики методов и средств лазерной интерферометрии, опирающихся на фундаментальные константы и обеспечивающих единство измерений в микро- и нанодиапазонах с

фиксацией передачи размера от первичного эталона длины – метра к рабочему средству измерений.

На рынке научно-исследовательских работ и фундаментальных исследований адаптивная интерферометрическая измерительная система может быть применена для:

- Измерения и анализа полей деформаций материалов и конструкций при статических нагрузках.
- Измерения и анализа динамических процессов на фоне квазидинамических (медленно протекающих) деформаций - текучесть, температурное расширение, деформации при изменении давления, влажности и т.д.
- Вибрационный анализ - определение форм колебаний, полей виброперемещений и динамических деформаций при различных видах вибраций - резонансных и вынужденных колебаниях, нестационарных, случайных, многокомпонентных вибрациях.
- Анализ закономерностей распространения упругих волн при быстропотекающих воздействиях - ударных, взрывных, сейсмических.
- Исследование концентрации напряжений, трещинообразования, остаточных напряжений.
- Исследование физико-механических свойств новых материалов (в том числе, наноматериалов).
- Изучение аномалий механических свойств, выявление и изучение закономерностей развития дефектов в материалах и конструкциях.
- Биомеханика - Исследование механических свойств и анализ деформаций протезов, костей и др. биологических объектов.

В процессе выполнения данного НИР сформировалось самостоятельное направление исследований, имеющее высокую практическую значимость и перспективу коммерциализации. Это измерений сверхмалых масс (микровесы) на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра.

Новизна данного направления исследований заключается в использовании адаптивной интерферометрической системы для детектирования, на основе

использования динамических диффузионных голограмм, формируемых в фоторефрактивном кристалле лазерным излучением.

Одна из приоритетных задач данного НИР - создание экспериментального макета измерительной системы на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра для измерения сверхмалых масс микро- и нанообъектов, включая наночастицы.

Исследования по оптимизации параметров микрокантилеверов, используемых на платформах АСМ, показали, что для них существует порог детектирования объектов массой порядка 10^{-14} г. В метрологическом плане это измерение массы конгломератов частиц размером 100-200 нм, а также ультратонких пленок и биологических мембран. Оптимизация параметров кремниевых консолей показала, что с использованием кантилеверов размером $20 \times 0,3 \times 0,3$ мкм³ можно уменьшить порог детектирования до 10^{-16} г., что сравнимо с массой квантовых точек размером не более 30 нм.

Данные технические характеристики разрабатываемой системы могут найти спрос в различных приложениях науки, медицины и промышленности. По сути микрокантилеверные системы - это твердофазные преобразователи биохимических реакций, протекающих на их поверхности, в аналитический сигнал. В перспективе, при оптимизации параметров кантилеверов, а также использовании селективных покрытий или квантовых точек, данная система позволит проводить измерения массы микрообъектов до 10^{-18} г (масса вируса) и измерять силы межмолекулярного взаимодействия в ультратонких пленках.

Высокой степенью коммерциализации данной разработки можно достичь при интегрировании поляризационно-независимого адаптивного интерферометра для измерения сверхмалых масс с высокоразрешающим интерферометрическим ближнепольным оптическим микроскопом, что принципиально расширяет круг научно-исследовательских задач. Принципиально, вещество и его свойства можно исследовать как в жидкостной фазе, так и в твердотельной, в динамическом режиме обработки сигнала. С помощью микровесов может регистрироваться изменение массы на подложке или изменение свойств прикрепленной к подложке пленки, возможно поддерживать необходимый газовый состав в камере, температуру и т.д.

Следует отметить, что прямых аналогов разрабатываемой модели измерительного прибора на российском рынке нет. Это объясняется тем, что детектирование колебаний в микрокантилеверных системах взвешивания осуществляется, в основном, оптическими методами. Использование интерферометрической адаптивной системы является новизной данного проекта и ни у одного аналога измерительной системы не используется. Ближайшими аналогами данной разрабатываемой измерительной системы являются ультрапрецизионные системы взвешивания отдельных микрочастиц, бактерий и вирусов на базе микрокантилеверных датчиков, использующихся в атомно-силовой микроскопии.

На данный момент разработки на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра для измерения сверхмалых масс, перемещений. Колебаний находится на стадии НИР. Следовательно, стадии коммерциализации проекта по сегментам «Измерительные приборы для исследований наноразмерных процессов» можно представить следующим образом:

1. Стадия «Скрытая коммерциализация»: НИР, ОКР, опытный образец, экспериментальное производство (так как представлен только экспериментальный макет приборов).
 - 2010 -2013 гг. – фундаментальные исследования;
 - 2013- 2016 гг. прикладные исследования и разработка технологий;
 - 2017-2018 гг. опытные образцы и их применение;
2. Стадия «Выход на рынок» (период 3-5 лет): создается серийное производство (мелкое и серийное). - 2018-2019 гг. начало коммерческого производства и выход на рынок.

Основными (потенциальными) потребителями разработок на российском рынке являются научно-производственные компании, научно-исследовательские и образовательные центры - активные участники Российской национальной нанотехнологической сети (RusNanoNet). Задача портала - создание единого информационного пространства для всех участников отечественной nanoиндустрии.

Для ИАПУ ДВО РАН этот подход коммерциализации разработок является наиболее конструктивным и перспективным по многим причинам. Во-первых, институт является активным участником многих программ RusNanoNet, регулярно представляет свои разработки на многих международных и российских выставках. Во-вторых, академик РАН Кульчин Ю.Н., директор ИАПУ ДВО РАН, является главным представителем программ НОР (представительства RusNanoNet в регионах) в Приморском крае, что также способствует продвижению и коммерциализации разработок, проводимых в институте.

Таблица 4.1 – Потенциальные потребители разработок, проводимых в рамках данного НИР, в Дальневосточном регионе

№ п/п	Вид коммерческой деятельности	Компании	Область применения
1	Строительные компании, занимающиеся строительством и обслуживанием крупных зданий и сооружений	-«Корпорация Инжтрансстрой», - НПО «Мостовик», -УСК «Мост», -ЗАО «Крокус Интернэшнл», ОАО «Дальмостострой» - ЗАО «ГМК». –Дальневосточный арматурный завод «Аскольд»	Для таких крупных объектов, как высотные здания, мосты, построенных в зоне тектонических разломов, изменяющихся течений, сильных ветров или вязких грунтов, очень важен мониторинг устойчивости и целостности конструкций. В этом ключе разработка «Сверхчувствительный адаптивный интерферометр для нанометрологии. (измеритель динамических наноперемещений)» может найти широкое применение.
2	Основные производители	-Арсеньевская авиационная компания	При проектировании и сборке летательных аппаратов, узлов и

	конструкторской авиапромышленности	«Прогресс» - Комсомольский-на- Амуре авиационный завод имени Ю. А. Гагарина (ведущее производственное предприятие Авиационной Холдинговой Компании «Сухой»)	проводится анализ деформаций узлов и деталей при статических, вибрационных, ударных, тепловых воздействиях, при нагрузении внутренним давлением; выявление дефектов в узлах из композитных материалов. В этом направлении перспективно применение поляризационно-независимого адаптивного интерферометра для измерения слабых электрических и магнитных полей , т.к. данный прибор устойчив к различным видам электромагнитных помех (шум, вибрация и тп) и обладает большой чувствительностью по сравнению со своими аналогами.
3	Химическая промышленность	-ЗАО Бор, Горно- химическая компания, г.Дальнегорск	Размерно-массовый анализ глубокой переработки руд. Адаптивная интерферометрическая измерительная система сверхмалых масс «Измеритель сверхмалых масс».

На российском и международном рынках перспективно внедрение и сотрудничество в различных областях научных исследований и отраслях промышленности с применением самых современных аналитических приборов. В этом ключе разработки, полученные в процессе выполнения НИР, можно рассматривать как самостоятельные или интегрированные модули в научно-исследовательских комплексах.

Таблица 4.2 – Потенциальные индустрии и компании, которые могут использовать разработки, проводимые в рамках данной НИР

№ п/п	Направления в наноиндустрии:	Компании	Область применения
1	Метрология и сертификация	-Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ВНИИОФИ) -Корпорация NMI -INTERTECH Corporation	Приборы для стандартизации -Адаптивная интерферометрическая измерительная система сверхмалых масс «Измеритель сверхмалых масс». -поляризационно-независимый адаптивного интерферометра для измерения слабых электрических и магнитных полей,
2	Нанoeлектроника	-Группа компаний «Брукер» -ЗАО «НТ-МДТ» -Tokyo Boeki Ltd (официальный представитель японских производителей научно-аналитического оборудования: JEOL, Nikon, Rigaku, SPSS) -WITecGmbH	самостоятельные или интегрированные модули - измерения масс -наноперемещений -нанопозиционирования -оптической и сканирующей зондовая микроскопии высокого разрешения
3	Нанoeлектроника	-Polytec	-Акустический гидрофон/микрофон -высокоскоростной виброметр

Таким образом, проектные технологии создания приборов для исследований нанопроцессов является конкурентоспособной на современном рынке аналитического оборудования. Коммерческие перспективы проекта зависят от состояния и тенденций развития рынков, на которые будут ориентированы технологии создания приборов.

Заключение

Таким образом, в ходе выполнения настоящей НИР получены следующие основные результаты.

В ходе 1-го этапа НИР выполнен аналитический обзор и проведен патентный поиск существующих подходов и методов в построении измерительных систем, применяемых в практических задачах нанометрологии, включая измерение линейных наноперемещений, наноколесаний, профиля поверхности, масс и размеров нанообъектов, параметров слабых электрических и магнитных полей и пр. Результаты анализа свидетельствуют о перспективности выбранного подхода в создании нового класса ультрачувствительных помехоустойчивых систем нанометрологии на основе поляризационно-независимых (ПН) адаптивных интерферометров.

Предложена новая геометрия ортогонального трёхволнового 3D-взаимодействия в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии.

Теоретически показано и экспериментально обосновано, что в схеме трёхволнового взаимодействия объектного пучка с двумя опорными, распространяющимися во взаимно ортогональных направлениях в ФРК кубической симметрии вдоль его основных кристаллографических осей [100], [010] и [001], в последнем формируется три динамических голограммы, дифракция волн на которых в соответствие носит анизотропный характер. Показано, что на базе ортогонального трёхволнового взаимодействия может быть реализован полностью поляризационно-независимый адаптивный интерферометр, в котором объектная волна может иметь произвольное состояние поляризации, что в свою очередь позволяет свести к предельному минимуму поляризационные шумы, понизить порог детектирования, увеличить динамический диапазон измерения. Выполнено экспериментальное исследование процессов фазовой демодуляции излучения с разным поляризационным и модовым составом в адаптивном интерферометре на основе динамических голограмм, сформированных в геометрии трехволнового ортогонального взаимодействия с использованием двух эллиптически поляризованных опорных волн. Показано, что динамическая голограмма, сформированная в 3D-ортогональной трехволновой геометрии, способна

обеспечить устойчивую поляризационно-независимую демодуляцию фазы световой волны, полученной как на выходе одномодового, так и многомодового волоконного световодов.

Предложен и исследован принцип мультиплексирования ортогональных динамических голограмм, в рамках которого объектные световые пучки распространяются в кристалле вдоль основного кристаллографического направления, где взаимодействуют с двумя опорными эллиптически поляризованными пучками, распространяющимися под углом в 90 градусов к объектным. Определены условия, выполнение которых позволяет исключить возможность появления перекрестных помех между каналами, ассоциированными с мультиплексируемыми голограммами. В ходе экспериментального исследования процесса мультиплексирования динамических голограмм, показано, что уровень перекрестных помех между каналами остается ниже уровня собственных шумов в канале даже в случае полного перекрытия световых полей отдельных каналов в кристалле.

На основе геометрии ортогонального трехволнового взаимодействия практически реализована работа 6-ти канального адаптивного волоконно-оптического интерферометра, в котором в качестве сенсоров используются стандартные многомодовые волоконные световоды. Показано, что перекрестные шумы между каналами интерферометра не связаны с взаимодействием волн в фоторефрактивном кристалле и не превышают уровня 1% от основного сигнала в канале, что служит экспериментальным подтверждением независимости работы каналов.

В ходе 2-го этапа НИР разработан и изготовлен экспериментальный макет и выполнены экспериментальные исследования измерительной системы (ИС) на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра, оптимизированного для регистрации и измерения наномасштабных перемещений и колебаний макро- и микрообъектов. В качестве тестовых микрообъектов были использованы волоконные световоды, а также микрокантилеверы. Определены рабочие характеристики системы, а также критерии применимости ИС для регистрации перемещений. Установлено, что в режиме регистрации перемещений работа измерительной системы определяется соотношением скорости перемещения

и некоторой характерной скорости системы V_0 , определяемой временем записи динамической голограммы в кристалле, которая для использованного в работе кристалла CdTe составила 2,2 мкм/с. Показано, что наиболее устойчивая работа измерительной системы обеспечивается при измерении перемещений со скоростями близкими или превышающими V_0 . При этом минимальный порог детектирования перемещений составил: в режиме регистрации медленных перемещений (при скоростях меньше характерной) - 1,9 нм; в режиме регистрации перемещений со скоростями близкими к характерной - 1,7 нм; в режиме регистрации быстрых перемещений (при скоростях больше характерной) - 1,6 нм. Динамический диапазон измерений наноперемещений 42 дБ. Чувствительность измерительной системы в режиме регистрации нанокосебаний составила $1,8 \times 10^{-7}$ нм(Вт/Гц)^{1/2}. В работе определены оптимальные параметры формы объектного пучка интерферометра, позволяющие обеспечить наиболее эффективный контроль перемещений и колебаний микромасштабных объектов.

Разработан экспериментальный макет многоканальной поляризационно-независимой адаптивной интерферометрической измерительной системы (МАИИС) на основе мультиплексирования ортогональных динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии, оптимизированной для регистрации параметров слабых динамических полей и проведены экспериментальные исследования функционирования системы в задачах регистрации параметров слабых распределенных вибрационных полей. Реализована система с 26-ю каналами. Определена чувствительность системы, эквивалентная порогу детектирования перемещений поверхности, которая составила $(0,97 \pm 0,3) \times 10^{-6}$ нм(Вт/Гц)^{1/2} на канал. Показано, что разработанная МАИИС способна обеспечить регистрацию и восстановление пространственных распределений вибрационных полей с амплитудой от 2,2 мкм до 110 мкм с пространственным разрешением $1,3 \text{ см}^{-1}$.

В ходе 3-го этапа НИР создан экспериментальный макет и проведены экспериментальные исследования измерительной системы на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра для измерения сверхмалых масс микро- и нанообъектов, включая наночастицы. В качестве чувствительного элемента измерительной системы используются кремниевые

кантилеверы прямоугольной формы. Возбуждение собственных колебаний кантилеверов осуществляется оптическим методом с помощью импульсного лазера.

Экспериментально определена толщина тонкой золотой пленки, образованной на кантилевере в вакуумной камере, посредством измерения смещения частоты собственных колебаний кантилевера. Толщина пленки составила 32 нм, масса 3,1 нг, что хорошо согласуется с толщиной пленки измеренной в сканирующем электронном микроскопе, которая составила 25 ± 8 нм. Для апробации работы измерительной системы в задаче измерения масс микро и нанообъектов на кантилеверы помещались частицы золота с диаметром от 40 до 300 нм, после чего кантилеверы устанавливались в измерительную систему. Каждый лазерный импульс, возбуждающий колебания, приводил к отсоединению от кантилевера некоторого количества частиц, что приводило к соответствующему изменению частоты колебаний. Чувствительность измерительной системы составила $1,7 \times 10^{12}$ Гц/г, порог детектирования $8,5 \times 10^{-12}$ г. Выполнена оптимизация параметров микрокантилевера, выполняющего функцию чувствительного элемента интерферометра, с целью детектирования объектов массой порядка 10^{-14} г. Показана потенциальная возможность уменьшения порога детектирования до 10^{-16} г.

Разработан экспериментальный макет измерительной волоконно-оптической системы на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра для измерения слабых электрических и магнитных полей. Основной принцип работы системы заключается в преобразовании переменного магнитного поля в фазовую модуляцию излучения, проходящего по многомодовому волоконному световоду, с помощью магниточувствительного кантилевера с прикрепленным на его свободном конце постоянным магнитом и участком многомодового волоконного световода, также прикрепленного к кантилеверу. В ходе экспериментальных исследований обнаружено, что наибольшая чувствительность измерительной системы достигается в том случае, когда волоконный световод находится в состоянии статического натяжения. Установлено, что при проектировании сенсора необходимо также учитывать резонансный характер кантилевера, поскольку чувствительность сенсора существенно зависит от соотношения частоты

детектируемого сигнала $F_{\text{раб}}$ и резонансной частоты кантилевера $F_{\text{рез}}$. Показано, что при оптимальном отношении частот $F_{\text{рез}}/F_{\text{раб}}=1,19$ чувствительность сенсора составляет 0,28 дБ/мкТл и динамический диапазон 11 дБ.

В ходе заключительного этапа НИР проведена дополнительная серия экспериментов с целью исследования возможности и определения путей улучшения характеристик измерительных систем на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра. Исследована работа адаптивного интерферометра при взаимодействии объектных и опорных волн с разным состоянием поляризации, задаваемыми при помощи четверть волновых пластинок, в схемах двухволнового (2D) и трехволнового (3D) ортогональных взаимодействий. Экспериментально показано, что переход от схемы 2D взаимодействия к 3D, позволяет существенно снизить флуктуации амплитуды сигнала демодуляции, вызванные изменением поляризационного состояния объектной волны. Установлено, что оптимальным между плоскостью поляризации опорной волны и быстрой осью второй четвертьволновой пластинки при этом является угол в 84° , при котором режим работы адаптивного интерферометра приближается к поляризационно-независимому: флуктуации сигнала демодуляции снижаются до 18% (минимальное значение глубины модуляции выходного сигнала 2,8%, максимальное – 3,4%).

Проведены эксперименты, направленные на изучение работы систем на основе адаптивных поляризационно-независимых интерферометров при малых интенсивностях излучения опорных и объектного пучков, которые позволяют достичь «щадящего» режима работы системы по отношению к исследуемому объекту и уменьшают энергопотребление всей системы в целом. Установлено, что уменьшение мощности входного излучения в 10 раз сопровождается снижением демодуляционного сигнала всего в 2 раза. При этом работоспособность системы сохраняется вплоть до снижения интенсивности объектного пучка до уровня, равного пределу чувствительности фотоприемника.

В разработанной многоканальной адаптивной интерферометрической измерительной системе (МАИИС) исследовано влияние соотношения интенсивностей опорных и сигнальных световых пучков на уровень чувствительности в отдельно взятом канале при разном количестве одновременно

включенных каналов. Установлено, что включение дополнительных работающих каналов не оказывает заметного влияния на работу отдельно взятого канала. При этом оптимальное соотношение интенсивностей, при котором достигается минимальный порог детектирования (18 ± 3), составило 0,15.

Выполнено численное моделирование работы сенсорной части МАИИС, сравнение его с экспериментальными результатами и теоретическим расчетом с целью проверки, насколько точно измерительные линии повторяют деформации исследуемой поверхности. В рамках моделирования рассчитывалось удлинение измерительных линий, жестко закрепленных на исследуемой поверхности, совершающей поперечные колебания. На основе удлинений измерительных линий рассчитывался сигнал на выходе из каждой линии, формируя тем самым набор томографических данных, который в свою очередь использовались для численного моделирования восстановления колебаний поверхности. Сравнение результатов численного моделирования с томографическим восстановлением на основе экспериментальных данных, полученных ранее с помощью МАИИС, а также с учетом расчета формы колебаний упругой мембраны позволяют заключить, что сенсорная часть МАИИС действительно повторяет форму колебаний исследуемой мембраны, тем самым обеспечивая достоверное томографическое восстановление распределения ее поперечных колебаний. Таким образом, МАИИС может успешно применяться в задачах мониторинга слабых вибрационных полей.

Проведена оптимизация схемы поляризационно-независимого адаптивного интерферометра с целью снижения затрат на его изготовление. Установлено, что оптимизацию можно осуществить за счет уменьшения размеров оптомеханических элементов систем; перехода от использования юстируемых оправ для оптических элементов к неюстируемым; использования источников лазерного излучения меньшей мощности; уменьшения размеров ФРК. Показано, что проведение оптимизации позволяет снизить стоимость разработанных измерительных систем на основе поляризационно-независимого адаптивного интерферометра на 54%.

Обзор научно-информационных источников и анализ международного и российского рынков показали, что среди измерительных систем для регистрации сверхмалых масс, наномасштабных перемещений, колебаний и вибраций, а также слабых вибрационных и электрических полей прямых аналогов разработанных в

настоящей НИР систем в России и в мире нет. Показано, что проектные технологии создания приборов на основе поляризационно-независимых адаптивных интерферометров для исследований нанопроцессов является конкурентоспособными на современном рынке аналитического оборудования.

Выработаны рекомендации по дальнейшему развитию и коммерциализации поляризационно-независимого адаптивного интерферометра, предназначенного решения практических задач нанометрологии.

Все работы настоящей НИР выполнены в тесном сотрудничестве с коллективом лаборатории Оптических сенсорных технологий Департамента прикладной физики (ДПФ) Университета Восточной Финляндии (УВФ), который в соответствии с Соглашением между ИАПУ ДВО РАН и ДПФ УВФ от 24.06.2011 принял участие в обсуждении полученных результатов, подготовке совместной публикации и отчетных материалов.

Финские коллеги приняли непосредственное участие в оптимизации схемы поляризационно-независимого адаптивного интерферометра, обобщении полученных результатов за весь период проекта, а также в разработке рекомендаций по использованию полученных в ходе НИР результатов в дальнейших исследованиях и разработках.

Полученные в ходе НИР результаты вносят существенный вклад в развитие исследований многоволновых взаимодействий в нелинейных оптических средах. Результаты могут быть положены в основу создания сверхвысокочувствительных помехоустойчивых систем нанометрологии.

Все задачи настоящей НИР выполнены полностью.

По результатам выполнения НИР опубликовано 8 работ [42-49], в том числе 1 с непосредственным участием финских коллег, подано 2 заявки на патент на полезную модель [50, 51].

Список использованных источников

1. Wagner J.W., Spicer J. Theoretical noise-limited sensitivity of classical interferometry // J. Opt. Soc. Am. B. – 1987. – V.4. – P.1316-1326.
2. Josten G., Lüthy W., Weber H. P. Active phase stabilization in a two-fiber interferometer // Appl. Phys. B. – 1990. – V.51. – №.6. – P.418-420.
3. Karhade O., Degertekin L., Kurfess T. Active control of grating interferometers for extended-range low-noise operation // Opt. Lett. – 2009. – V.34. – №.19. – P.3044-3046.
4. Stepanov S.I. Adaptive interferometry: a new area of applications of photorefractive crystals / International Trends in Optics, ed. J. W. Goodman. – New York, London: Academic Press, Inc, – 1991. – Ch. 9.
5. Romashko R.V., Di Girolamo S., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Photorefractive vectorial wave mixing in different geometries // J. Opt. Soc. Am. B. – 2010. – V.27. – №.2. – P.311-317.
6. Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Launay J.-C. Opt. Express, 15, 2, 545-555 (2007)
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. с. 426-430.
8. Тодуа П.А. Метрология в нанотехнологии // Российские нанотехнологии.- 2007.- Т2.- №1-2.-С.61-69.
9. Herbst T.M., Beckwith S. V. W. Active stabilization system for Fabry-Perot interferometers // Appl. Opt. – 1989. – V.28, P.5275-5277.
10. Karhade O., Degertekin L., Kurfess T. Active control of grating interferometers for extended-range low-noise operation // Opt. Lett. – 2009. – V.34. –№.19. – P.3044-3046.
11. Krishnamachari V.V., Andresen E.R., Keiding S. R., Potma E.O. An active interferometer-stabilization scheme with linear phase control // Optics Express. – 2006. – V.14. – №.12. – P. 5210-5215.
12. S.V. Gupta. Nano-Technology for Detection of Small Mass Difference. // Journal of Metrology Society of India, Vol. 23, No. 3, 177-192 (2008)
13. S. Singamaneni et al. Bimaterial Microcantilevers as a Hybrid Sensing Platform. // Advanced Materials, Vol. 20, 653-680 (2008)

14. L.M. Lechuga, J. Tamayo, M. Blvarez et al. A highly sensitive microsystem based on nanomechanical biosensors for Genomics applications. // *Sensors and Actuators B*, Vol. 118, 2-10 (2006)
15. B. Ilic, et al. Mechanical resonant immunospecific biological detector. // *Applied Physics Letters*, 77, p 450-452 (2000)
16. Bashir R. BioMEMS: state-of-the-art in detection, opportunities and prospects. // *Advanced Drug Delivery Reviews*, 56, 1565-1586. (2004)
17. B. Ilic, H.G. Craighead, S. Krylov, W. Senaratne, C. Ober, and P. Neuzil. Attogram detection using nanoelectromechanical oscillators // *J. Appl. Phys.* - Vol.95. (2004)
18. Тодуа П.А. Фронт нанотехнологических исследований и нанометрология // Научно-практический семинар «Проблемы практического внедрения нанотехнологий и диагностика наносостояний». 6-я Специализированная выставка «Изделия и технологии двойного назначения. Конверсия ОПК». Сборник научных трудов и инженерных разработок. Результаты фундаментальных исследований и их использование в инженерных разработках. М., 2005. С. 76–78.
19. С.А. Дарзбек, Ж. Желкобаев, В.В. Календин, Ю.А. Новиков, Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений, ТРУДЫ ИНСТИТУТА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ им. А.М. ПРОХОРОВА Том 62, 2006, стр. 14-37
20. Валитов Р.А., Сретенский С.Н. Радиотехнические измерения. М.: Радио, 1970. 712 с
21. Intelligent Optical Systems, Inc., USA, [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://intopsys.com/laserultrasound08.html>
22. Bossa Nova Technologies, USA, [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.bossanovatech.com/tempo.htm>
23. Понькин Н. А. Что в имени твоём, масс-спектрометрия? Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики / ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2006. 4-14 с.
24. I.V.Yaminsku, G.A. Kiselev Scanning probe microscopy of biomacromolecules: instrumentation and experiments *Frontiers of Multifunctional Integrated Nanosystems*, 2004, 123-130.

25. Т.Ким, С.Ким, К.Ванг, Г.Киселев, И.Яминский Кантилеверные наносенсоры: возможности и применения Наноиндустрия, 2009, т.5, с.34-37.
26. Ekinici K. L., Yang Y. T., and Roukes M. L. Ultimate limits to inertial mass sensing based upon nanoelectromechanical systems J. Appl. Phys. 95, 2682 (2004).
27. А.Ю. Иванов, А.М. Плохотниченко Низкотемпературные кварцевые микровесы Приборы и техника эксперимента, 2009, № 2, с.166-169.
28. Chaste J., Eichler A., Moser J., Ceballos G., Rurali R. and Bachtold A. A nanomechanical mass sensor with yoctogram resolution Nature Nanotechnology, 7, p.301-304, (2012).
29. Официальный сайт компании ‘Закрытое акционерное общество «НТ-МДТ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ntmdt.ru>
30. ООО «Академия биосенсоров» [Электронный ресурс] – Режим доступа: : www.nanoscopy.ru; www.nanoscopy.net
31. F.M. Battiston et al., A chemical sensor based on a microfabricated cantilever array with simultaneous resonance frequency and bending readout, Sensors and Actuators, 2001, B. 77, 122-131
32. Lee S.-M., Hwang K.S., Yoon H.-J., Yoon D.S., Kim S.K., Lee Y.-S., Kim T.S. Sensitivity Enhancement of Dynamic Microcantilever by Stress Inducer and Mass Inducer to Detect PSA at Low Picogram Level. – Lab Chip, 2009, v. 21; № 9(18), p. 2683–2690.
33. S. Lee, J. Cho, Y. Lee, S. Jeon, H. J. Cha, W. Moon Measurement of Hepatitis B Surface Antigen Concentrations Using a Piezoelectric Microcantilever as a Mass Sensor Journal of Sensors, Volume 2012, Article ID 217958
34. Cation Corp., Дания [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.cation.com/Products.htm>
35. Concentris Inc., Швейцария [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.concentris.ch/index.php?id=9>
36. G. W. Day and A. H. Rose, “Faraday effect sensors: the state of the art,” in Fiber Optic and Laser Sensors, edited by R. P. Depaula and E. Udd, Proc. SPIE 985, 138–149, (1988).
37. T. Yoshino, S. Torihata, M. Yokota and N. Tsukada, Appl. Optics 42, 1769-1772, (2003).

38. G. Robles and R. Giannetti, "Magneto-optic Faraday effect current sensors based on thin cobalt film," in IEEE Proceedings of the IMTC, 2000, pp. 1547-1550.
39. D. Drung, C. Assmann, J. Beyer, A. Kirste, M. Peters, F. Ruede, and Th. Schurig "Highly sensitive and easy-to-use SQUID sensors", Transactions on Applied Superconductivity 17 (2): p.699, (2007).
40. Корнев В. К. Эффект Джозефсона и его применение в сверхпроводниковой электронике. // Соросовский образовательный журнал, 2001, № 8, с. 88.
41. Гольцман Г. Н. Эффекты Джозефсона в сверхпроводниках. // Соросовский образовательный журнал, 2000, № 4, с. 100.
42. Ромашко Р.В., Ефимов Т.А., Асалханова М.А. Адаптивный голографический регистратор наноперемещений микрообъектов // Сборник научных трудов II Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике 2013, МИФИ, Москва, 23-25 января 2013. ISBN 978-5-7262-1623-2 – С. 26-27.
43. Romashko R.V., Efimov T.A., Asalkhanova M.A., Kulchin Y.N. Holographic measurement system for macro- and micro-objects nanoscale displacement detection // Pacific Science Review. – 2013. – V.15. – N.1. – P.15-17.
44. Romashko R.V., Bezruk M.N., Kamshilin A.A., Kulchin Y.N. Adaptive distributed tomographic fiber-optical measurement system for non-destructive testing // Pacific Science Review. – 2013. – V.15. – N.1. – P.24-26.
45. Ромашко Р.В., Ефимов Т.А., Асалханова М.А. Голографическая система измерений наноперемещений микро- и макрообъектов // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, ISSN 1818-0442, – 2012, – 2(26), с.63-66.
46. Ромашко Р.В., Безрук М.Н., Кульчин Ю.Н. Реконструкция параметров слабых вибрационных полей с помощью многоканального адаптивного волоконно-оптического интерферометра // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, ISSN 1818-0442, – 2012, – 2(26), с.67-70.
47. Т.А. Ефимов, Ю.Н. Кульчин, Р.В. Ромашко. Адаптивная голографическая система измерения массы наночастиц на основе резонансного микро-взвешивания // Тезисы 2-ой Школы-семинара молодых ученых «Фотоника

- нано- и микроструктур ФНМС-2013», г.Владивосток, 10-14 февраля, 2013. – CD-ROM.
48. М.Н. Безрук, Ю.Н. Кульчин, Р.В. Ромашко. Адаптивная многоканальная волоконно-оптическая система для томографической реконструкции слабых вибрационных полей // Тезисы 2-ой Школы-семинара молодых ученых «Фотоника нано- и микроструктур ФНМС-2013», г.Владивосток, 10-14 февраля, 2013. – CD-ROM.
 49. М.А. Асалханова, Т.А. Ефимов, Р.В. Ромашко. Адаптивная голографическая система регистрации наномасштабных перемещений микрообъектов // Тезисы 2-ой Школы-семинара молодых ученых «Фотоника нано- и микроструктур ФНМС-2013», г.Владивосток, 10-14 февраля, 2013. – CD-ROM.
 50. Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В., Ефимов Т.А., Асалханова М.А. Адаптивный регистратор малых перемещений / Заявка на Полезную модель № 2013177028 от 12.04.2013 г.
 51. Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В., Безрук М.Н. Адаптивный волоконно-оптический микрофон / Заявка на Полезную модель № 2013177027 от 12.04.2013 г.