

На правах рукописи

РОМАШКО Роман Владимирович

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ
СВЕРХВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ АДАПТИВНЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ
ГОЛОГРАММ**

01.04.21 – лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук



Владивосток – 2010

Работа выполнена в Институте автоматике и процессов управления
Дальневосточного отделения РАН

Научный консультант: член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор
Кульчин Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Компанец Игорь Николаевич
(Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН)

доктор физико-математических наук
Соколов Игорь Александрович
(Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН)

доктор физико-математических наук, профессор
Букин Олег Алексеевич
(Морской государственный университет
им. Г.И. Невельского)

Ведущая организация: Международный учебно-научный лазерный центр
Московского государственного университета им.
М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится "24" мая 2010 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 005.007.02 при Институте автоматике и процессов управления Дальневосточного отделения РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматике и процессов управления Дальневосточного отделения РАН.

Автореферат разослан "21" апреля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 005.007.02,
кандидат технических наук, доцент



Е. Л. Гамаюнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы: Неразрушающее исследование и мониторинг материалов и компонентов устройств нано-, микро- и оптоэлектроники, а также структурных элементов технических и инженерных конструкций в процессе их изготовления и/или эксплуатации является чрезвычайно важной и актуальной задачей современной науки и техники. Лазерные измерительные технологии находят широкое применение в данных областях, в то время как методы оптической интерферометрии рассматриваются как одни из наиболее чувствительных для регистрации сверхмалых физических величин. Теоретический порог детектирования малых флуктуаций фазы в классическом интерферометре, ограниченный дробовым шумом фотоприёмника, составляет $1,5 \times 10^{-9} \text{ рад}(\text{Вт}/\text{Гц})^{1/2}$ [1], что в частности позволяет регистрировать механические вибрации с амплитудой менее $0,01 \text{ \AA}$ в полосе частот 100 кГц при использовании излучения мощностью 1 мВт на длине волны 500 нм. Однако, для достижения столь высокой чувствительности на практике необходимо решить две основные проблемы. Во-первых, необходимо обеспечить полное сопряжение волновых фронтов интерферирующих волн в плоскости фотоприёмника и, во-вторых, реализовать и постоянно поддерживать квадратурные условия, при которых средняя разность фаз между волнами равна $\pi/2$. Комплексное решение обеих проблем достигается за счёт объединения интерферирующих световых пучков на динамической голограмме, формируемой ими же в фоторефрактивном кристалле (ФРК) [2, 3]. Благодаря конечности времени записи динамической голограммы интерферометрическая система, построенная на её основе, становится адаптивной, т.е. способной подстраиваться под неконтролируемые изменения внешних факторов, и сохранять работоспособность в реальных (внелабораторных) условиях. При этом голографический принцип объединения пучков позволяет обеспечить полное сопряжение абсолютно разных волновых фронтов.

Адаптивные системы на основе динамических фоторефрактивных (ФР) голограмм разрабатываются уже на протяжении нескольких десятилетий со времени открытия в 1966 году ФР эффекта [4]. К настоящему времени создано и используется большое количество реализаций адаптивных интерферометров [5].

Вместе с тем целый ряд проблем остается нерешенным. Так, большинство адаптивных измерительных систем построено на основе дрейфовых динамических голограмм, формируемых в ФРК в присутствии сильного постоянного электрического поля. Это позволяет напрямую выполнить квадратурные условия, а также повысить чувствительность измерительной системы. Однако, использование внешнего электрического поля ведет к появлению целого ряда серьезных техниче-

ских проблем, к числу которых относятся, в частности, эффект экранирования внешнего поля и перегрев кристалла. Эффект экранирования приводит к сильному ослаблению взаимодействия световых пучков. Способы устранения эффекта экранирования, основанные на увеличении поперечных размеров световых пучков (до межэлектродного расстояния) или использовании фоновой засветки кристалла дополнительным излучением, приводят, соответственно, к неизбежному уменьшению интенсивности света внутри кристалла (и, как следствие, к снижению скорости записи голограммы), или к увеличению энергопотребления измерительной системы. Для предотвращения перегрева кристалла (чреватого его разрушением) электрическое поле прикладывают лишь в течение коротких интервалов времени (~ 1 мс), чередуя их периодами релаксации (~ 10 с) [6]. Как следствие, измерение осуществляется лишь в импульсном режиме, что оказывается неприемлемым в ряде практических приложений, а, кроме того, требует использования специальной синхронизирующей электроники, что также усложняет измерительную систему. Применение высоковольтных электрических полей также делает затруднительным использование измерительных систем в полевых условиях, сужая область их практического применения.

В этой связи целым рядом исследователей были предприняты попытки реализации адаптивных интерферометров на основе диффузионных динамических голограмм, формируемых в кристалле в отсутствие внешних электрических полей. Диффузионные голограммы не поддерживают напрямую линейного преобразования фазы в изменение интенсивности из-за нелокального ФР отклика, что обуславливает необходимость поиска дополнительных способов, позволяющихinearизовать режим демодуляции фазы.

Известны решения, основанные на использовании внешней модуляции фазы одной из волн адаптивного интерферометра [7, 8]. Основным недостатком данного подхода является значительное снижение дифракционной эффективности голограммы вследствие ухудшения контраста интерференционной картины, вызванного ее движением. Кроме того, в таких системах требуется использование дополнительных электронных устройств как для внесения внешней фазовой модуляции, так и для обработки выходного сигнала, что усложняет измерительную систему и увеличивает её собственные шумы.

Известны схемы адаптивных интерферометров, в которых линейный режим фазовой демодуляции на диффузионной голограмме реализуется за счет установки перед фоторефрактивным кристаллом или после него волновых фазовых элементов с последующей поляризационной фильтрацией [9, 10]. Вместе с тем использование поляризационных фильтров, пропускание которых для циркулярно поляри-

зованных или деполяризованных световых пучков не превышает 50%, вносит значительные оптические потери и приводит к соответствующему снижению чувствительности интерферометра. Кроме того, использование поляризационных фильтров становится причиной появления дополнительного поляризационного шума, если состояние поляризации объектной волны нестабильно [11] или меняется под воздействием измеряемой величины [12].

Таким образом, для создания высокоэффективных адаптивных измерительных систем требуется разработка как новых поляризационно-независимых схем адаптивных интерферометров, способных работать с использованием излучения, имеющего произвольное (в т.ч. нестабильное) состояние поляризации, так и новых эффективных методов снижения поляризационного шума.

Еще одна проблема, связанная с использованием диффузионных голограмм (помимо отсутствия прямого выполнения квадратурных условий), заключается в их типично невысокой дифракционной эффективности, что является следствием относительно слабого поля пространственного заряда, формируемого в отсутствие внешнего электрического поля. Вместе с тем известно, что знакопеременное электрическое поле, приложенное к фотопроводящему кристаллу, обладающему высокой подвижностью фотоиндуцированных носителей зарядов, позволяет значительно увеличить поле пространственного заряда [13]. При этом переменное электрическое поле, в отличие от постоянного, не вызывает эффекта экранирования, а голограмма имеет такой же фазовый сдвиг относительно интерференционной картины, как и в случае чисто диффузионной записи. Основным недостатком данного метода заключается в том, что прикладываемое к кристаллу напряжение должно иметь достаточно высокую частоту ($\sim 10^4$ Гц). Учитывая, что при этом величина напряжения составляет несколько кВ, становится очевидным факт усложнения измерительной системы, который сохраняет актуальность поиска схем, не использующих никаких внешних электрических полей.

Другая не менее важная проблема заключается в обеспечении высокой скорости записи динамической голограммы, что необходимо для эффективной компенсации результатов воздействия на измерительную систему неконтролируемых внешних факторов. Известно, что время записи динамической голограммы в ФРК помимо его материальных параметров определяется интенсивностью светового излучения [14], повышая которую можно достичь нужную частоту отсечки. Повышение интенсивности излучения в кристалле может быть выполнено как за счёт уменьшения поперечных размеров взаимодействующих пучков, так и за счёт увеличения общей мощности излучения. Однако в первом случае это приводит к нежелательному сокращению длины взаимодействия пучков в кристалле и, как след-

ствие, к снижению чувствительности системы. Другой подход ведёт к непропорциональному росту как энергопотребления измерительной системы, так и её стоимости. Таким образом, несомненную актуальность представляет задача разработки оптимальной системы формирования световых пучков, которая бы позволила обеспечить их максимальную фокусировку в толще кристалла при сохранении полного взаимоперекрывания пучков, сделав возможной запись максимально эффективной динамической голограммы с минимальным временем отклика при использовании оптического излучения малой мощности.

Следующая проблема связана с созданием многомерных адаптивных измерительных систем, состоящих из большого числа сенсоров (измерительных каналов). Увеличение числа каналов в таких системах требует использования большого количества как фоторефрактивных кристаллов, так и опорных световых пучков, что влечёт собой нежелательное усложнение измерительной системы. Одно из возможных решений данной проблемы заключается в мультиплексировании набора соответствующих измерительным каналам динамических голограмм в одном фоторефрактивном кристалле. Попытки реализации такого подхода были предприняты в работах [15, 16]. В первой из них разделение каналов в кристалле осуществлялось за счёт создания условий, при которых перекрёстные и основные голограммы имеют в кристалле различную пространственную ориентацию, а внешнее электрическое поле, приложенное определённым образом к кристаллу, обеспечивает селективное усиление только основных голограмм. Во второй работе предложен метод спектрального мультиплексирования дрейфовых динамических голограмм, в рамках которого голограммы формируются в кристалле световыми пучками с разными, но близкими длинами волн, а демultipлексирование сигналов в разных каналах осуществляется с помощью узкополосных спектральных фильтров. Недостатком обоих методов является необходимость приложения к кристаллу сильного внешнего электрического поля с вытекающими отсюда последствиями (эффект экранирования, перегрев кристалла и пр.). Кроме этого, в методе на основе спектрального мультиплексирования количество реализуемых каналов оказывается ограниченным спектральной чувствительностью кристалла и шириной спектра источника излучения. Указанные трудности делают чрезвычайно актуальной проблему разработки новых эффективных методов мультиплексирования диффузионных динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах без использования внешних электрических полей и спектральных элементов и построения на их основе многоканальных адаптивных измерительных систем.

Целью диссертационной работы является исследование процессов векторного взаимодействия двух и более когерентных световых волн в фоторефрактив-

ных кристаллах кубической симметрии, поиск принципиально новых схем построения адаптивных интерферометров на основе диффузионных динамических голограмм, разработка и изучение физических принципов организации сверхвысокочувствительных помехоустойчивых многоканальных измерительных систем на их основе.

В работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование процессов векторного взаимодействия когерентных световых волн с разным типом поляризации на динамических диффузионных голограммах, формируемых в фоторефрактивных кристаллах кубической симметрии (групп 23 и $\bar{4}3m$) в условиях изотропной и анизотропной дифракции.

2. Разработка принципов построения адаптивных корреляционных и интерферометрических измерительных систем на основе динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивных кристаллах без приложения внешних электрических полей.

3. Поиск оптимальных значений параметров кристалла (ориентация, концентрация ФР центров, коэффициент поглощения, размеры) и взаимодействующих волн (соотношение интенсивностей, состояние поляризации), позволяющих обеспечить наибольшую чувствительность адаптивного интерферометра на основе отражательной динамической диффузионной голограммы.

4. Исследование процессов распространения в ФРК сильно сфокусированных световых пучков для оптимизации формирования в кристалле максимально эффективной динамической голограммы с минимальным временем записи при использовании оптического излучения малой мощности.

5. Разработка методов снижения поляризационных шумов в адаптивном волоконно-оптическом интерферометре.

6. Разработка принципов организации поляризационно-независимых схем адаптивных интерферометров, способных работать с использованием (в качестве объектной волны) излучения с произвольным, в т.ч. нестабильным состоянием поляризации, а также деполяризованного излучения.

7. Исследование процессов многоволнового взаимодействия в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии, сопровождающих мультиплексную запись диффузионных динамических голограмм, с целью определения схем взаимодействия, которые исключают появление перекрестных помех при считывании мультиплексируемых голограмм.

8. Разработка принципов организации многоканальных сверхчувствительных адаптивных измерительных систем, свободных от перекрестных шумов, на

основе мультиплексирования в фоторефрактивном кристалле самосогласованных, отражательных и ортогональных голограмм.

Основные положения, выдвигаемые на защиту:

1. Результаты исследования процессов векторного взаимодействия когерентных световых волн с разным типом поляризации на отражательных, в том числе самосогласованных, диффузионных динамических голограммах, формируемых в фоторефрактивных кристаллах кубической симметрии и разработанные на их основе новые принципы организации адаптивных сверхчувствительных интерферометров и адаптивной корреляционной фильтрации для обработки интерференционных сигналов, реализуемые без приложения внешнего электрического поля к кристаллам.

2. Физико-математическая модель схемы оптимальной фокусировки когерентных световых волн, формирующих в фоторефрактивном кристалле отражательную динамическую голограмму, позволяющая для конкретного кристалла, рабочей длины волны и доступной мощности лазерного излучения, а также заданного предела допустимого расхождения световых пучков в кристалле обеспечить максимальную плотность мощности интерферирующих световых пучков и полное их перекрытие на всей длине кристалла, создав тем самым необходимые условия для записи динамической голограммы с максимальной дифракционной эффективностью и минимальным временным откликом.

3. Новый принцип организации адаптивных интерферометров, основанный на ортогональном взаимодействии когерентных световых волн в фоторефрактивном кристалле, открывающий возможность использования в измерительном плече полностью деполяризованных объектных волн, в том числе прошедших через многомодовые волоконные световоды. Впервые предложена и обоснована асимметричная схема ортогонального взаимодействия световых волн в фоторефрактивном кристалле интерферометра, в которой опорная волна претерпевает чисто анизотропную дифракцию на динамической голограмме, тогда как объектная волна не испытывает дифракции, что позволяет существенно повысить чувствительность и уменьшить поляризационный шум адаптивного интерферометра.

4. Принцип создания поляризационно-независимого адаптивного интерферометра на основе впервые предложенного трёхволнового ортогонального 3D-взаимодействия когерентных световых волн в фоторефрактивном кристалле, позволяющий использовать в плече объектной (сигнальной) волны излучение с произвольным типом поляризации и нестабильными поляризационными параметрами.

5. Схемы записи использующих общую опорную волну мультиплексированных отражательных и ортогональных диффузионных динамических голограмм

в кубическом фоторефрактивном кристалле среза (100), исключая возникновение перекрестного шума в измерительных каналах, вследствие создания условия запрета взаимодействия объектных волн между собой.

6. Принципы организации защищенных от воздействия перекрестных шумов сверхчувствительных многоканальных адаптивных волоконно-оптических интерферометрических измерительных систем, основанных на мультиплексировании самосогласованных, отражательных и ортогональных голограмм, записываемых в фоторефрактивном кристалле.

Научная новизна.

1. Проведено детальное теоретическое и экспериментальное исследование векторного взаимодействия волн с разным типом поляризации в кристаллах кубической симметрии.

2. Впервые предложена и реализована схема адаптивного интерферометра на основе векторного взаимодействия волн с разным типом поляризации на отражательной динамической голограмме, формируемой в фоторефрактивном кристалле без использования внешних электрических полей. Экспериментальное значение относительного порога детектирования в адаптивном интерферометре на основе кристалла CdTe составило $\delta_{rel} = 5,7$ (потенциально возможное значение $\delta_{rel} = 1,5$), что является наилучшим показателем для адаптивных интерферометров на основе диффузионных голограмм.

3. Впервые выполнено детальное теоретическое и экспериментальное исследование распространения предельно сфокусированных световых пучков с гауссовым распределением интенсивности, формирующих динамическую голограмму в фоторефрактивном кристалле.

4. Впервые предложена, исследована и реализована схема адаптивного интерферометра на основе ортогонального взаимодействия волн в ФРК, позволяющая использовать в качестве объектной волны деполаризованное излучение без применения дополнительных методов поляризационной фильтрации.

5. Впервые предложена и теоретически и экспериментально обоснована схема поляризационно-независимого адаптивного интерферометра на основе трёхволнового ортогонального 3D-взаимодействия световых пучков в ФРК.

6. Впервые определена геометрия мультиплексирования отражательных и ортогональных диффузионных динамических голограмм, исключая появление перекрестных помех, без использования внешних электрических полей или спектральных методов.

Научная и практическая значимость диссертации заключается в том, что представленные в работе исследования закладывают фундамент для создания

сверхвысокочувствительных адаптивных измерительных систем, предназначенных для детектирования сверхмалых физических величин (вибраций, колебаний, деформаций, перемещений нано- и субнанометрового диапазона, динамических напряжений, параметров сверхслабых динамических силовых полей и так далее) в условиях неконтролируемого влияния факторов окружающей среды (дрейф температуры, технические вибрации, нестабильность объекта исследования и пр.)

Решения, найденные в диссертации, позволяют:

- предельно упростить схему адаптивного измерительного интерферометра за счёт устранения необходимости приложения к фоторефрактивному кристаллу внешнего электрического поля;

- повысить чувствительность адаптивного измерительного интерферометра за счёт записи динамических голограмм на высоких пространственных частотах, реализуемых в отражательной геометрии;

- снизить поляризационные шумы за счёт использования ортогональной геометрии двухволнового взаимодействия, которая позволяет устранить из схемы адаптивного интерферометра поляризационные фильтры;

- обеспечить полную поляризационную независимость адаптивного интерферометра, что открывает перспективы использования в качестве объектного светового пучка излучения с произвольным типом поляризации;

- многократно снизить требуемую мощность источника излучения в адаптивном интерферометре (понижив тем самым уровень энергопотребления и повысив автономность) без потери чувствительности и быстродействия за счет оптимальной фокусировки световых пучков в ФРК;

- обеспечить эффективное использование методов адаптивной интерферометрии при создании многомерных/многоканальных оптических и волоконно-оптических измерительных систем, расширив область их практического применения и снизив стоимость оборудования.

Созданы макеты адаптивных, в том числе многоканальных (на 2 и 6 каналов), волоконно-оптических интерферометрических сенсорных систем на основе динамических голограмм, формируемых в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ и $\text{CdTe}:\text{V}$, способных обеспечить широкополосное детектирование (в полосе 100 кГц) малых динамических воздействий, эквивалентных акустическим колебаниям диффузно-рассеивающих объектов с амплитудой $\sim 0,1 \text{ \AA}$ при мощности сигнального пучка в 10 мВт.

Результаты, полученные в диссертации, могут найти применение:

- в системах контроля микро- и нано-электромеханических систем (MEMS / NEMS), а также элементов макросистем с субнанометровым разрешением;

- в системах неразрушающего исследования и тестирования элементов конструкций и материалов, в т.ч. в системах диагностики на основе лазерного ультразвука (обнаружение дефектов, измерение толщин, и пр.);
- в ждущих детекторах сверхслабых динамических физических величин, характеризующихся кратким проявлением на длительных временных интервалах;
- в детекторах сверхслабых полей, в том числе акустических, гидроакустических, электрических, магнитных, гравитационных, а также в сейсморазведке;
- в биологических и биомедицинских исследованиях (детектирование вирусов, бактерий, молекул ДНК, других сверхмалых частиц с массой до нескольких аттограмм);
- при исследовании квантово-механических флуктуаций вакуума, светового давления и других слабых эффектов.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на IV Всероссийском семинаре «Люминесценция и сопутствующие явления» (Иркутск, 1998 г.), XXXXII Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики и математики» (Владивосток, 1999 г.), Байкальской научной молодежной школе по фундаментальной физике БШФФ-99 (Иркутск, 1999 г.), 3-м Международном студенческом конгрессе стран Азиатско-Тихоокеанского региона (Владивосток, 1999 г.), Международной конференции по фотонике "Photonics ODS'2000" (Украина, Винница, 2000 г.), Азиатско-тихоокеанских конференциях по фундаментальным проблемам опто- и микроэлектроники APCOM (Владивосток, 2000, 2002, 2003, 2005, 2007, 2009 г.г.; Хабаровск, 2004 г.; Япония, Токио, 2008 г.), 13-ой Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-2000» (Санкт-Петербург, 2000 г.), Международной конференции по оптическим методам в сенсорике и нанотехнологии ICOSN'2001 (Япония, Йокогама, 2001 г.), Региональных научных конференциях по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов ППДМ-2000 и ППДМ-01 (Владивосток, 2000, 2001 г.г.), Международном семинаре по опто- и микроэлектронике и преобразованию световых пучков IWBT (Владивосток, 2001 г.), VII Международной конференции Optics Within Life Sciences OWLS'02, (Швейцария, Люцерн, 2002 г.), Международных научно-практических конференциях "Электронные средства и системы управления" (Томск, 2003, 2004 г.г.), IV Школе-семинаре «Современные проблемы физики, технологии и инноваций СФТИ-2003» (Томск, 2003 г.), Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 04» (Санкт-Петербург, 2004 г.), Международных конференциях по разработке систем оптики и фотоники ODF'04, ODF'06, ODF'08 (Япония, Токио, 2004 г., Япония, Нара, 2006 г.; Тайвань, Тайпэй,

2008 г.), XII и XIII Научных школах "Нелинейные волны" (Нижний Новгород, 2004, 2006 г.г.), Международных конференциях по фоторефрактивным эффектам, материалам и устройствам PR-05, PR-09 (Китай, Санья, 2005 г.; Германия, Бад Хоннеф, 2009 г.), Европейских конгрессах по лазерам, электрооптике и квантовой электронике "CLEO/Europe-EQEC" (Германия, Мюнхен, 2005, 2007, 2009 г.г.), Международных симпозиумах по фотонике и лазерам PALS'05, PALS'09 (Финляндия, Кайани, 2005 г.; Финляндия, Тампере, 2009 г.), 4-ой Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2005» (Санкт-Петербург, 2005 г.), Международном конгрессе по оптике ICO-20 (Китай, Чанчунь, 2005 г.), 8-ом Международном симпозиуме по современным технологиям фотоники CPT-2005 (Япония, Токио, 2005 г.), 7-ой Международной конференции по лазерным методам измерения вибраций (Италия, Анкона, 2006 г.), Международной конференции по мощным лазерным пучкам (Нижний Новгород, 2006 г.), Научных сессиях МИФИ (Москва, 2006, 2007, 2008, 2010 г.г.), Международной конференции "Northern Optics 2006" (Норвегия, Берген, 2006 г.), 8-й Международной конференции по микро и нанопотонике ROMOPTO-2006 (Румыния, Сибиу, 2006 г.), 5-ой Тематической конференции по оптоэлектронным системам измерения расстояний и перемещений ODIMAP V (Испания, Мадрид, 2006 г.), Международных конференциях по волоконно-оптическим датчикам OFS-18, OFS-19 (Мексика, Канкун, 2006 г.; Австралия, Перт, 2008 г.), Всероссийском семинаре «Нанопотоника» (Черноголовка, 2007 г.), 3-й Международной конференции по оптической и лазерной диагностике ICOLAD-2007 (Великобритания, Лондон, 2007 г.), Всероссийском семинаре «Юрий Николаевич Денисюк - основоположник отечественной голографии» (Санкт-Петербург, 2007 г.), Международных симпозиумах по измерительным технологиям и интеллектуальным приборам ISMTII'2007, ISMTII'2009 (Япония, Сендай, 2007 г.; Санкт-Петербург, 2009 г.), Международных конференциях "Optics Days" (Финляндия, Лаппеенранта, 2007 г.; Финляндия, Куопио, 2008 г.), 16-ом Международном симпозиуме "Наноструктуры: Физика и технология" (Владивосток, 2008 г.), 15-ой Международной конференции по оптоэлектронике и оптической связи (Южная Корея, Пусан, 2008 г.), 2-ой Тематической конференции по оптической сенсорике и системам технического зрения OSAV'08 (Санкт-Петербург, 2008 г.), а также на научных семинарах в ИАПУ ДВО РАН, Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН (Владивосток), Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (Томск), Университете г. Куопио (Финляндия, Куопио), Корейском институте электронных технологий (KETI, Южная Корея, Сёнгам), Электромеханическом институте Самсунг (SEM, Южная Корея, Суон).

Работа проводилась при поддержке ряда Российских и международных фондов и организаций: РФФИ, Министерства образования и науки РФ, ДВО РАН, ОФН РАН, Совета при Президенте РФ по поддержке молодых ученых, INTAS, Академии Финляндии, Федерации научных обществ Южной Кореи.

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе были отмечены: Премией имени профессора В.П.Вологодина за разработку адаптивных распределенных оптоэлектронных измерительных систем (Владивосток, ДВГТУ, 1999 г.), Дипломом за лучший доклад на IV Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2005» (Санкт-Петербург, 2005 г.), Дипломом за лучший доклад на Международном симпозиуме по измерительным технологиям и интеллектуальным приборам ISMTIP'2007 (Япония, Сендай, 2007 г.), Первой премией в номинации «Нанотехнологии» за проект «Сверхчувствительный адаптивный интерферометр для нано-метрологии», представленный на 1-ой Приморской Венчурной Ярмарке (Владивосток, 2009 г.)

Внедрение результатов. Результаты работы используются в КБ ОАО «Дальприбор» (г.Владивосток) при проектировании и создании адаптивных волоконно-оптических гидроакустических приёмников.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс подготовки специалистов в области лазерной физики квантовой и оптической электроники в Дальневосточном государственном техническом университете (г.Владивосток), Морском государственном университете им.Г.И.Невельского (г.Владивосток) и Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 100 печатных работ, в том числе 39 статей в отечественных и зарубежных изданиях (15 из которых входят в Перечень ВАК РФ), 1 монография, получено 3 патента РФ.

Личный вклад автора. Содержание диссертации отражает персональный вклад автора в опубликованные работы. На начальном этапе диссертационной работы постановка задачи осуществлялась совместно с доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН, профессором Ю.Н.Кульчиным. Ряд работ выполнен в соавторстве с сотрудниками Томского университета систем управления и радиоэлектроники (группа д.ф.-м.н., профессора С.М.Шандарова) и Института автоматики и процессов управления ДВО РАН, а также в творческом сотрудничестве с коллективами ряда зарубежных организаций: Университета г.Куопио (Финляндия; группа профессора А.А.Камшилина) и Института химии твердого тела при Французском национальном центре научных исследований CNRS (Франция, г. Бордо; группа Dr. J.-C.Launay, предоставившая образцы кристаллов). В ходе работы над диссертацией автором выполнены все

теоретические расчеты; все экспериментальные исследования проведены им лично или под его руководством. В коллективной монографии [40] лично автором написаны главы 5, 6 и 8.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 283 наименований, включая работы автора. Работа содержит 102 рисунка, 11 таблиц; полный объём работы, включая приложения, 309 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассматриваются современные тенденции развития адаптивных лазерных измерительных систем, определяются нерешённые в этой области проблемы, ставится задача исследований, определяется цель работы, формулируются выдвигаемые на защиту положения.

В **первой главе** излагаются современные представления о природе фоторефрактивного эффекта, а также основные положения скалярной и векторной моделей взаимодействия волн в фоторефрактивном кристалле в той мере, которая необходима для обеспечения теоретической основы построения новых адаптивных измерительных систем, принципы которых разработаны в настоящей диссертации.

В **§1.1** анализируются особенности реализации квадратурных условий в адаптивном интерферометре на основе двухволнового взаимодействия в ФРК. На основе скалярной модели показано, что характер изменения интенсивности фазомодулированной объектной волны, взаимодействующей в кристалле с опорной, зависит от режима записи голограммы, определяющего величину фазового сдвига голографической решётки относительно формирующей её интерференционной картины. Отмечается, что в условиях скалярного взаимодействия линейный режим фазовой демодуляции возможен только в случае дрейфовой записи голограммы, при приложении к кристаллу постоянного электрического поля. При этом оптимальное значение напряженности внешнего поля $E_0^{opt} = (k_B T N_A / \epsilon \epsilon_0)^{1/2}$ определяется концентрацией фоторефрактивных центров N_A , а типичная величина составляет несколько десятков кВ/см.

На основе векторной модели обосновываются условия реализации линейного режима фазовой демодуляции за счёт взаимодействия волн с разным типом поляризации на диффузионной динамической голограмме, формируемой в ФРК кубической симметрии в отсутствие внешнего электрического поля. Показано, что если опорная волна поляризована эллиптически, а дифракция на диффузионной голограмме носит анизотропный характер, при котором происходит взаимодействие между ортогональными поляризационными компонентами волн, интенсивность

объектной волны будет изменяться прямо пропорционально величине фазовой модуляции φ :

$$\Delta I_1(\varphi) \approx -2\kappa_D L I_0^{-1} [b_s b_p (\alpha_s^2 - \alpha_p^2) + \sin \tilde{\alpha} \cdot \alpha_s \alpha_p (b_s^2 - b_p^2)] \times \varphi. \quad (1)$$

где κ_D - константа связи волн; L - толщина кристалла; I_0 - суммарная интенсивность излучения в кристалле; $\alpha_{s,p}$, $b_{s,p}$ - ортогональные поляризационные компоненты объектной и опорной волн, соответственно; $\tilde{\alpha}$ - разность фаз между ортогональными поляризационными компонентами объектной волны.

В §1.2 даются теоретические основы расчёта относительного порога детектирования (ОПД) в адаптивном интерферометре, как критерия его чувствительности. Показано, что ОПД, определяемый как отношение абсолютного порога детектирования фазы в адаптивном интерферометре к аналогичной величине классического гомодинного интерферометра, свободного от оптических потерь, может быть найден (в т.ч. экспериментально) через коэффициент пропускания \mathfrak{Z} , учитывающий оптические потери объектной волны в кристалле и других элементах, коэффициент усиления G объектной волны за счет её взаимодействия с опорной на динамической голограмме, среднее значение мощности объектной волны P_{D0} и величину ее изменения ΔP_D , зарегистрированные фотоприёмником:

$$\delta_{rel} = \frac{\varphi_A^{lim}}{\varphi_C^{lim}} = \frac{\varphi}{\sqrt{\mathfrak{Z}G}} \frac{P_{D0}}{\Delta P_D}. \quad (2)$$

Систематизируются основные параметры адаптивных интерферометров – чувствительность, частота отсечки и общая оптическая мощность, – на основании значений которых проводится сравнительный анализ существующих и разработанных в диссертации схем адаптивных интерферометров. Показано, что между значениями чувствительности и частотой отсечки существует компромисс: образцы одного и того же кристалла, проявляющие в одинаковых условиях более высокую частоту отсечки, обладают пониженной чувствительностью, и наоборот. Более того, увеличение чувствительности в одном и том же образце кристалла (например, за счёт внешнего переменного поля), сопровождается снижением частоты отсечки. Отмечается, что предложенный и исследованный в настоящей диссертационной работе адаптивный интерферометр на основе кристалле CdTe:V, обладает наилучшей чувствительностью ($\delta_{rel} = 5,7$) среди известных интерферометров, работающий в полностью оптическом режиме (без внешнего электрического поля).

Вторая глава посвящена разработке принципов построения адаптивных измерительных систем (коррелятора и интерферометра) на основе отражательных диффузионных динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивных кристаллах кубической симметрии.

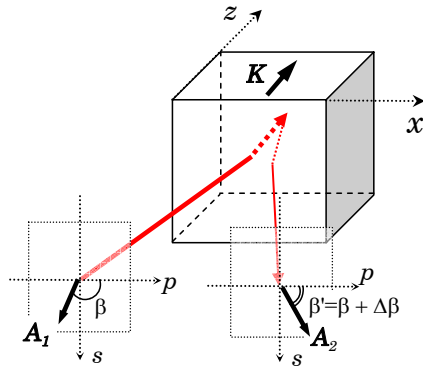


Рис.1. Геометрия формирования самосогласованной отражательной динамической голограммы

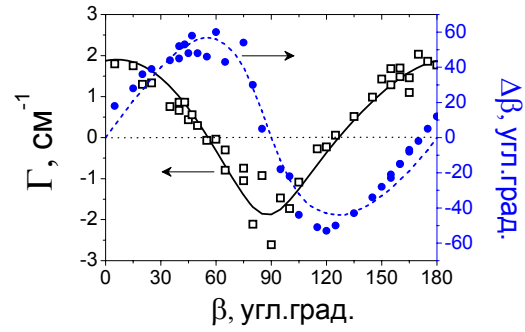


Рис.2. Поляризационные зависимости коэффициента двухволнового усиления и поворота плоскости поляризации: маркеры – эксперимент; линии - расчёт

В §2.1 проводится исследование особенностей формирования отражательных самосогласованных голограмм, формируемых в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (класс симметрии 23) и CdTe (класс симметрии $\bar{4}3m$) при частичном отражении входного гауссова пучка от выходной грани кристалла (рис.1). Рассматриваются кристаллы срезов (100), (110), (111) и $(\bar{1}\bar{1}2)$. Показано, что наиболее эффективное взаимодействие световых волн достигается тогда, когда вектор голографической решетки \bar{K} параллелен оси кристалла [100] для обоих рассмотренных кристаллов. Получено аналитическое решение для векторных амплитуд волн, взаимодействующих в кристалле класса симметрии $\bar{4}3m$ среза (100).

Показано, что во всех случаях, где дифракция носит анизотропный характер ($\bar{K} \parallel [001]$ и $\bar{K} \parallel [\bar{1}\bar{1}2]$), экстремумы поляризационных зависимостей коэффициента усиления при двухволновом взаимодействии $\Gamma(\beta)$ и наведенного поворота плоскости поляризации $\Delta\beta(\beta)$ смещены относительно друг друга. В частности, для случая $\bar{K} \parallel [001]$ максимальное усиление/ослабление сигнального пучка происходит без дополнительного поворота его плоскости поляризации, $\Delta\beta = 0$ (рис.2). И наоборот, максимальной наведенный поворот плоскости поляризации сигнального пучка сопровождается нулевым усилением. Это обстоятельство позволяет использовать отдельно как механизм модуляции мощности сигнального нестационарного светового пучка на отражательной динамической голограмме (самодифракцию), так и модуляцию его поляризационного состояния (поляризационную самомодуляцию) при построении системы демодуляции фазы световой волны.

В §2.2 исследуются процессы формирования динамической самосогласованной отражательной голограммы (СОГ) в фоторефрактивном кристалле волной со спекловым распределением интенсивности, полученной на выходе многомодового волоконного световода. Показано, что спекловая волна формирует голограмму, сопоставимую по эффективности с голограммой, записанной гауссовым пучком.

Разработаны принципы построения адаптивного корреляционного фильтра на основе СОГ. Показано, что мощность дифрагировавшего на самосогласованной голограмме излучения пропорциональна функции корреляции между исходным и текущим распределениями интенсивности спекловой волны (под исходным понимается распределение, соответствующее моменту времени $t - \tau_R$). Пространственные изменения распределения интенсивности спекловой волны, вызванные модуляцией ее фазы, приводят к изменению мощности отраженного на динамической голограмме излучения на величину:

$$\Delta P_1(t) = \frac{P_{1st}}{2T} \int_0^T \left\{ \frac{\sin([\Delta\Phi_{\max}(t) - \Delta\Phi_{\max}(t-\tau)]/2)}{[\Delta\Phi_{\max}(t) - \Delta\Phi_{\max}(t-\tau)]/2} \right\}^2 \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_E}\right) d\tau. \quad (3)$$

где P_{1st} - мощность отражённого излучения в стационарном режиме; τ_E - время стирания динамической голограммы; $\Delta\Phi_{\max}(t)$ - амплитуда модуляции разности фаз между модами спекловой волны.

При этом сигнал демодуляции, наблюдаемый на удвоенной частоте, может быть получен как за счет эффекта самодифракции, так и за счет поляризационной самомодуляции (рис.3), что определяется состоянием поляризации исходной волны (рис.2). Показано, что чувствительность адаптивного коррелятора к удлинению многомодового волоконного световода ($NA=0,21$; диаметр сердцевины 200 мкм), на выходе которого получена спекловая волна, составляет 1,4 дБ/мкм.

В §2.3 разрабатываются принципы построения адаптивного интерферометра на основе векторного взаимодействия волн на диффузионной отражательной голограмме, формируемой в ФРК кубической симметрии, и исследуются особенности его функционирования. Квадратурные условия реализуются за счёт векторного взаимодействия волн с разным типом поляризации (линейной и эллиптической) в условиях анизотропной дифракции. Высокая эффективность взаимодействия и, соответственно, высокая чувствительность достигаются за счёт высокой пространственной частоты голографической решетки, формируемой в отражательной геометрии. Экспериментально показано для кристалла CdTe:V, что переход от пропускающей к отражательной геометрии позволяет при достаточной концентрации фоторефрактивных центров добиться 4,5-кратного увеличения чувствительности интерферометра (рис.4).

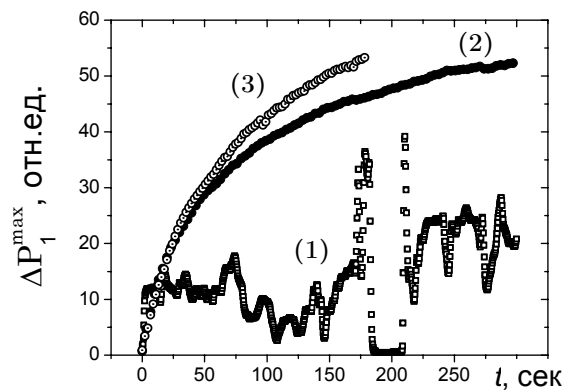


Рис.3. Динамика изменения амплитуды модуляции интенсивности на частоте первой (1) и второй (2, 3) гармоник в режимах самодифракции (2) и поляризационной самомодуляции (3), реализованных в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$

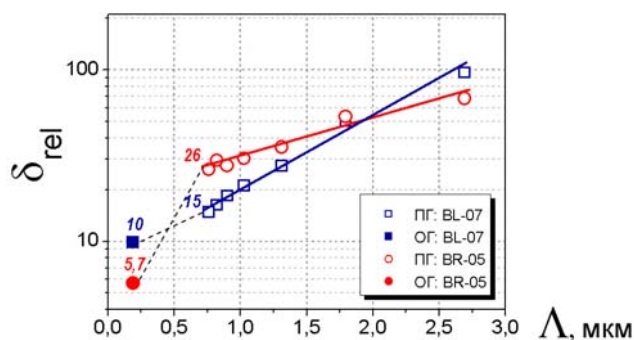


Рис.4. Экспериментальная зависимость ОПД от периода голографической решётки в двух образцах кристалла CdTe: ПГ, ОГ – пропускающая и отражательная геометрии записи

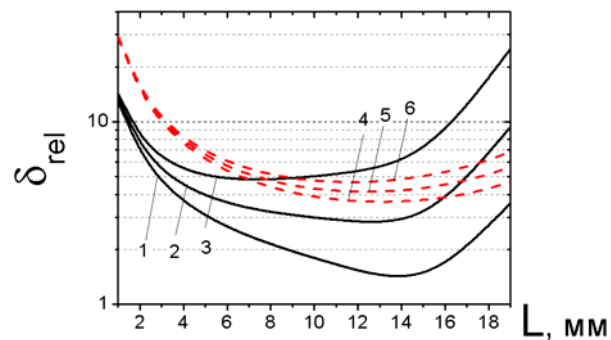


Рис.5. Зависимости ОПД от толщины кристалла CdTe (1,2,3) и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (4,5,6), полученные при разных значениях коэффициента поглощения

Исследована амплитудно-частотная характеристика адаптивного интерферометра, на основе диффузионной отражательной голограммы, записанной в разных образцах кристалла CdTe:V. Установлено, что образец, проявивший наибольшую чувствительность в отражательной геометрии ($\delta_{rel} = 5,7$), оказался более медленным (частота отсечки $f_{cut} = 175$ Гц при интенсивности 38 Вт/см^2); и наоборот – наиболее быстрый образец ($f_{cut} = 750$ Гц) проявил наименьшую чувствительность ($\delta_{rel} = 10$), что находится в соответствии с рассмотренным в Главе 1 компромиссом «чувствительность/адаптивность». Повышение интенсивности излучения до 270 Вт/см^2 за счет более плотной фокусировки пучков позволило увеличить частоту отсечки в указанных образцах до 500 и 1800 Гц, соответственно. Такая частота отсечки оказывается достаточной для компенсации большинства промышленных шумов, характерные частоты которых лежат в области до нескольких сотен Гц.

Выполнен теоретический анализ, позволивший определить оптимальные значения поляризационных и энергетических параметров волн (углов, задающих ориентации плоскости поляризации линейно поляризованной волны и главной оси эллипса эллиптически поляризованной волны, степени её эллиптичности, отношения интенсивностей волн), а также материальных параметров кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ и CdTe (толщины кристалла и коэффициента поглощения), при которых достигается наибольшая чувствительность интерферометра на основе отражательной динамической голограммы, формируемой в ФРК кубической симметрии. Показано, что при обеспечении оптимальных значений всех выше указанных параметров относительный порог детектирования в адаптивном интерферометре может быть снижен до $\delta_{rel} = 1,5$ (при использовании кристалла CdTe) и $\delta_{rel} = 3,6$ (для $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$) (рис.5).

Выполнено экспериментальное исследование шумов адаптивного интерферометра, построенного с использованием в качестве чувствительного элемента многомодового световода. Установлено, что источником наибольшего шума в

адаптивном интерферометре является поляризационный шум, вызванный флуктуациями в распределении состояния поляризации спекловой волны, преобразуемыми за счёт используемого поляризатора в флуктуации интенсивности. Наличие поляризационного шума приводит к повышению абсолютного порога детектирования, который при использовании стандартного многомодового световода с диаметром сердцевины 50 мкм составил $1,6 \times 10^{-7}$ рад $\sqrt{\text{Вт/Гц}}$, что в 19 раз выше теоретического порога, полученного в предположении наличия только дробового шума фотодетектора ($8,5 \times 10^{-9}$ рад $\sqrt{\text{Вт/Гц}}$). Предложен и исследован подход, позволяющий существенно снизить уровень поляризационного шума, суть которого заключается в увеличении числа мод, распространяющихся по волоконному световоду, за счёт увеличения диаметра сердцевины последнего, что позволяет добиться лучшего усреднения вкладов в поляризационный шум отдельных мод и свести тем самым его к минимуму. Экспериментально показано, что увеличение на два порядка числа каналируемых мод за счёт использования световода с диаметром сердцевины 550 мкм позволяет повысить отношение сигнал/шум в адаптивном интерферометре в среднем на 25 дБ. Абсолютный порог детектирования при этом снижается до $3,0 \times 10^{-8}$ рад $\sqrt{\text{Вт/Гц}}$, что всего в 3,6 раза превышает теоретический предел. Таким образом, практически достигнутая чувствительность адаптивного волоконно-оптического интерферометра при обеспечении в сигнальном пучке световой мощности в 1 мВт позволяет в реальных (нелабораторных) условиях устойчиво детектировать в широкой полосе частот (до 10 МГц) изменения длины волоконного световода (вызванные, например, вибрацией) с амплитудой в диапазоне от 0,2 до 110 нм.

На основе полученных результатов разработан макет адаптивного волоконно-оптического микрофона. Микрофон обладает рекордными по сравнению с известными интерферометрическими неадаптивными аналогами [17] значениями чувствительности к звуковому давлению (4,3 рад/Па на частоте 1 кГц) и порога детектирования звукового давления (0,79 мПа), а также сопоставимым значением динамического диапазона (55 дБ). Высокая чувствительность микрофона открывает перспективы по его использованию для детектирования сверхслабых акустических сигналов. При этом благодаря свойствам адаптивности микрофон может успешно работать в реальных условиях, характеризующихся нестабильностью параметров окружающей среды.

В **третьей главе** приводятся результаты исследования распространения сильно сфокусированных гауссовых световых пучков в фоторефрактивном кристалле с целью построения оптимальной фокусирующей системы, позволяющей обеспе-

читать запись максимально эффективной динамической голограммы с минимальным временем отклика при использовании оптического излучения малой мощности.

В §3.1 определяется наиболее простая оптическая схема фокусирующей системы на основе двух линз, размещаемых в оптические тракты объектного и опорного световых пучков, взаимодействующих в ФРК в отражательной геометрии (рис.6).

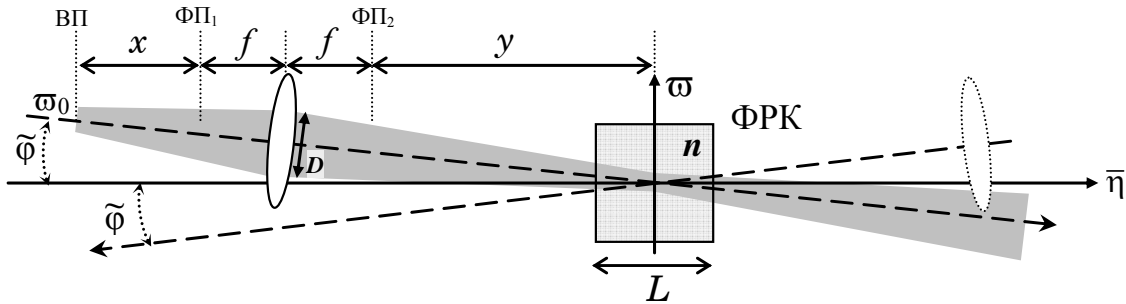


Рис.6. Геометрия фокусировки световых пучков

Задаются следующие условия оптимизации:

- 1) световые пучки должны иметь минимальный поперечный размер в центре кристалла;
- 2) световые пучки должны иметь минимальное расширение при распространении от центра кристалла к его грани;
- 3) световые пучки должны полностью перекрываться в толще кристалла.

Определяются исходные параметры задачи оптимизации: 1) толщина L и показатель преломления n ФР кристалла; 2) допустимая степень расширения гауссова пучка от центра кристалла к его периферии $\delta_\Delta = \Delta w(L/2)/w(0)$; 3) рабочая длина волны λ ; 4) размер перетяжки гауссова пучка на входе в оптическую систему w_0 (рис.6). Получены соотношения, определяющие значения параметров фокусирующей системы, обеспечивающей выполнение условий оптимизации:

$$1) \text{ для фокусного расстояния линз: } f_{opt} = w_0 \left(\frac{\pi L}{2n\lambda} \right)^{1/2} \left(\frac{2}{\delta_\Delta} \right)^{1/4}; \quad (4)$$

$$2) \text{ для расстояния от входной оптической плоскости системы до первой фокальной плоскости линзы: } x_{opt} = w_0^2 \pi / \lambda; \quad (5)$$

3) для расстояния от второй фокальной плоскости линзы до кристалла:

$$y_{opt} = \frac{L}{2n} \left(\frac{1}{\sqrt{2\delta_\Delta}} - 1 \right); \quad (6)$$

4) для максимального угла между осями световых пучков:

$$\tilde{\varphi}_{max} = \left(\frac{\lambda}{\pi n L} \right)^{1/2} \left(\frac{2}{\delta_\Delta} \right)^{1/4}. \quad (7)$$

Показано, что результирующий размер гауссова пучка в кристалле ϖ_{\min} , полученный с помощью оптимальной фокусирующей системы, не зависит от исходного размера пучка ϖ_0 , а определяется только параметрами кристалла и степенью допустимого расширения пучка: $\varpi_{\min} = \left(\frac{\lambda L}{2\pi n}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{2\delta_{\Delta}}\right)^{1/4}$. Таким образом, применение фокусирующей системы позволяет не только выполнить условия оптимизации взаимодействия, но и полностью согласовать в кристалле световые пучки с произвольными исходными размерами.

В §3.2 приводятся результаты практической реализации оптимальной фокусирующей системы, рассчитанной на основе выражений (3)-(6) для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ ($L = 8,0$ мм; $n = 2,58$; $\lambda = 632,8$ нм). В работе использовался He-Ne лазер ЛГН-223-1 с выходной мощностью 11 мВт, излучение которого изначально делилось на два одинаковых по мощности пучка. Сигнальный пучок ослаблялся при помощи нейтрального светофильтра в 100 раз. Экспериментальное значение радиуса гауссова пучка, полученное за счет оптимальной фокусировки в месте расположения кристалла, составило $\varpi_{\min}^{\text{э}} \approx 163$ мкм (расчётное $\varpi_{\min}^{\text{т}} = 159$ мкм). При мощности опорного пучка в 5,5 мВт такая фокусировка позволила достичь внутри кристалла уровня интенсивности в $6,93$ Вт/см², а время записи голограммы составило 5 сек. Для сравнения, время записи голограммы в этом же кристалле без использования оптимальной фокусирующей системы составляло 120 сек при интенсивности опорного пучка $0,35$ Вт/см² (мощность опорного пучка 27 мВт, общая мощность лазера 55 мВт). При этом, благодаря использованию оптимальной фокусирующей системы, опорный и сигнальный пучки по всей толщине кристалла практически не меняют своего размера с заданной точностью в $\delta_{\Delta} = 3 \times 10^{-4}$ и полностью перекрываются друг с другом, что обеспечивает максимальную эффективность их взаимодействия (коэффициент усиления при двух волновом взаимодействии сохранился на прежнем уровне).

Четвертая глава посвящена исследованию ортогональной геометрии взаимодействия волн в фоторефрактивном кристалле и разработке на ее основе принципов построения поляризационно-независимых схем адаптивных интерферометров.

В §4.1 приводится теоретический анализ векторного ортогонального взаимодействия эллиптически поляризованных волн в ФРК кубической симметрии (рис.7). Показано, что ди-

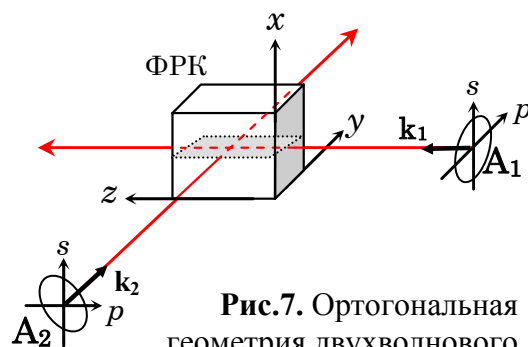


Рис.7. Ортогональная геометрия двухволнового взаимодействия в ФРК

намическая голограмма, сформированная в ортогональной геометрии, обладает поляризационной селективностью, что позволяет убрать из схемы адаптивного интерферометра, построенного в коллинеарной (пропускающей или отражательной) геометрии, поляризационный фильтр, используемый для задания необходимой поляризации. Показано, что линейная компонента модуляции интенсивности фазомодулированной объектной волны, взаимодействующей с эллиптически поляризованной волной в ортогональной геометрии, будет определяться выражением:

$$\Delta I_1(\varphi) = -2\kappa_D L_1 I_0^{-1} \left[h_{sp} a_s^2 b_s b_p - h_{ps} a_s a_p b_s^2 \sin \tilde{\alpha} + h_{pp} a_s a_p b_s b_p \cos \tilde{\alpha} \right] \times \varphi. \quad (8)$$

где h_{ij} - элементы матрицы связи волн ($i, j = s, p$).

Если объектная волна полностью деполаризована (например, получена на выходе многомодового световода или в результате диффузного рассеяния когерентного излучения), её поляризационные параметры принимают все возможные значения – $a_{s,p} \in [-a, a]$ и $\tilde{\alpha} \in [-\pi, \pi]$. Усреднение по всем реализациям поляризационных состояний приводит к исчезновению второго и третьего слагаемого в выражении (8); первый же член остаётся отличным от нуля, при условии неравенства нулю элемента матрицы связи h_{sp} , отвечающего за анизотропный характер дифракции. Таким образом, теоретически показано, что в ортогональной геометрии в условиях анизотропной дифракции становится возможной реализация линейного режима фазовой демодуляции без использования поляризационной фильтрации, в т.ч. для случая полностью деполаризованной волны.

В §4.2 анализируются различные ориентационные конфигурации, определяемые относительно кристаллографических осей тройкой векторов $(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{n}^K)$, а также ортогональным базисом (\vec{s}, \vec{p}) , задающим плоскости колебаний векторов напряженности электрических полей волн (рис.7). Определяются наиболее оптимальные конфигурации, при которых взаимодействия волн в кристалле происходит максимально эффективно (недиагональные элементы матрицы связи максимальны $h_{sp} = h_{ps} = 1/\sqrt{2}$), а их дифракция носит анизотропный характер (диагональные элементы матрицы связи h_{ss}, h_{pp} равны нулю) (Таблица 1).

Найдена асимметричная конфигурация ортогонального взаимодействия (Таблица 1), в которой матрица связи для одной из волн обращается в нулевую, что означает отсутствие дифракции этой волны, в то время как для второй волны матрица связи - единичная ($h_{sp} = h_{ps} = 1; h_{ss} = h_{pp} = 0$). Асимметричная конфигурация позволяют реализовать наиболее эффективный адаптивный интерферометр: в нём

реализуется максимальная связь опорной волны с объектной, в то время как объектная волна, не испытывая дифракции, не несёт связанных с этим потерь.

Таблица – 1 Оптимальные конфигурации ортогонального двухволнового взаимодействия в кубическом фоторефрактивном кристалле и соответствующие им матрицы связи

Волна \vec{A}_1				Волна \vec{A}_2			
\vec{k}_1	\vec{p}_1	\vec{s}	\hat{H}_1	\vec{k}_2	\vec{p}_2	\vec{s}	\hat{H}_2
Симметричные/антисимметричные конфигурации							
$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}$
$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}$
Асимметричные конфигурации							
$\begin{pmatrix} 0,92 \\ -0,38 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,38 \\ 0,92 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,38 \\ 0,92 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,92 \\ -0,38 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$

В §4.3 приводятся результаты экспериментального исследования процессов фазовой демодуляции в адаптивном интерферометре на основе ортогонального двухволнового взаимодействия в кристалле CdTe. Экспериментально показано, что в отличие от коллинеарных геометрий взаимодействия – пропускающей и отражательной (рис.8,а,б), где линейный режим фазовой демодуляции оказывается возможным только в случае линейно поляризованной объектной волны (рис.9,а,б), ортогональная геометрия (рис.8,в) обеспечивает эффективную демодуляцию фазы как линейно поляризованного, так и полностью деполаризованного излучения (рис.9,в), что находится в полном соответствии с выражением (8).

Выполнено экспериментальное исследование зависимости относительного порога детектирования от соотношения интенсивностей волн, взаимодействующих в ортогональной геометрии. Минимальное значение ОПД составило $\delta_{rel} = 16,2$, что соответствует абсолютному порогу детектирования $2,4 \times 10^{-8} \text{ рад} \sqrt{\text{Вт/Гц}}$. Установлено, что устранение из схемы адаптивного интерферометра поляризационного фильтра позволяет снизить уровень поляризационного шума в 8 раз (при использовании волоконного световода с диаметром сердцевины 550 мкм).

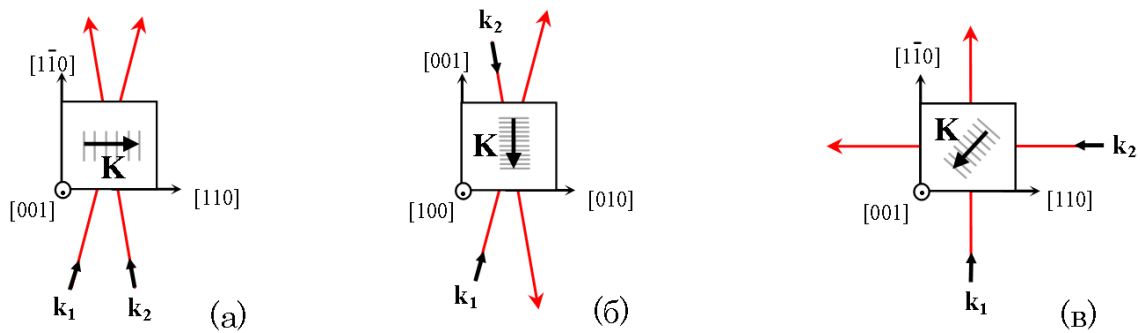


Рис.8. Пропускающая (а), отражательная (б) и ортогональная (в) геометрии двухволнового взаимодействия, поддерживающие анизотропную дифракцию

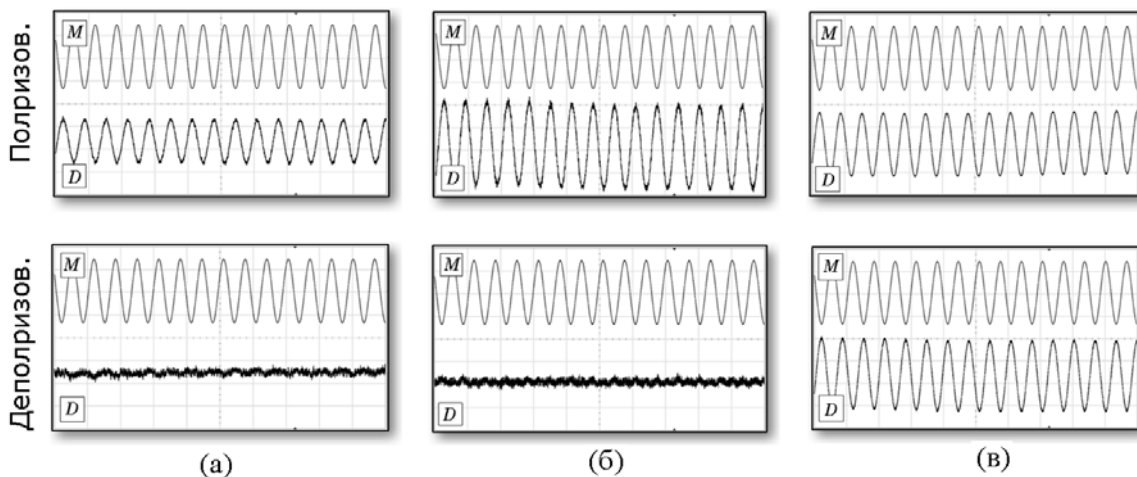


Рис.9. Осциллограммы сигналов модуляции (М) и демодуляции (D) фазы, полученные в трёх геометриях векторного взаимодействия волн: пропускающей (а), отражательной (б) и ортогональной (в). Верхний ряд: объектная волна поляризована линейно; нижний ряд: объектная волна деполаризована

В §4.4 проводится теоретический анализ зависимости эффективности фазовой демодуляции деполаризованной объектной волны, взаимодействующей в ортогональной геометрии с эллиптически поляризованной опорной, от значений поляризационных параметров опорной волны (степени эллиптичности \mathcal{G} и ориентации главной оси эллипса ψ), а также от материальных параметров фоторефрактивного кристалла (толщины L_1 , коэффициента поглощения α и концентрации фоторефрактивных центров N_A). Показано, что для кристалла CdTe близкими к оптимальным (при которых ОПД не превышает 10) могут рассматриваться следующие значения указанных параметров: $\mathcal{G}^{(\max)} = 0,05$; $\psi^{(\max)} = 150^\circ$ (относительно p -поляризации); $L_1 \approx (6 \div 11)$ мм; $\alpha < 1,5 \text{ см}^{-1}$; $N_A \approx (0,8 \div 3,0) \times 10^{16} \text{ см}^{-1}$. При этом значение относительного порога детектирования может составить менее 5.

В §4.5 выполняются приоритетные исследования предложенной в диссертации схемы ортогонального трёхволнового 3D-взаимодействия в фоторефрактив-

ном кристалле кубической симметрии (рис.10) с целью построения *полностью поляризационно-независимого* адаптивного интерферометра.

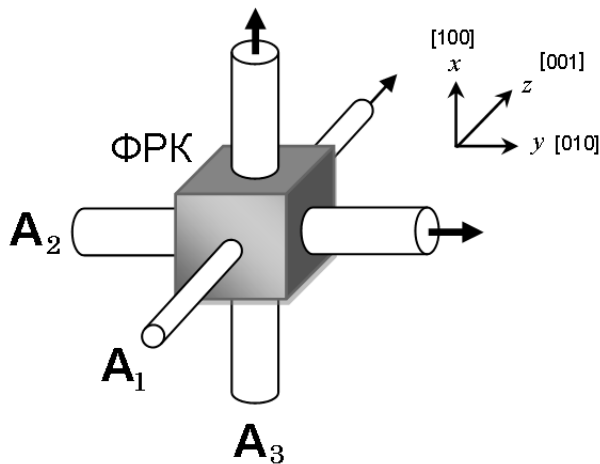


Рис.10. Ортогональная геометрия трёхволнового 3D-взаимодействия в фоторефрактивном кристалле

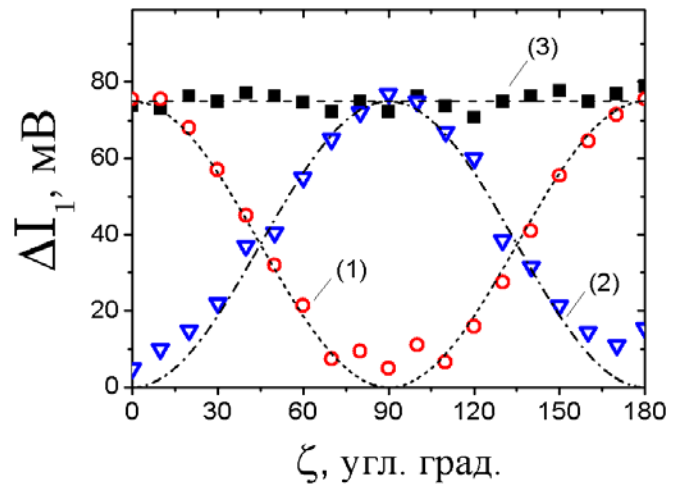


Рис.11. Поляризационная зависимость амплитуды сигнала демодуляции при двухволновом (1 и 2) и трёхволновом (3) ортогональных взаимодействиях в кристалле CdTe: точки - эксперимент; линии - расчёт

Как было показано в §§ 4.1 и 4.3, геометрия ортогонального взаимодействия двух волн позволяет обеспечить линейный режим фазовой демодуляции полностью деполаризованной сигнальной волны, что в свою очередь снимает необходимость использования в схеме адаптивного интерферометра поляризационных фильтров для выделения необходимого состояния поляризации. Вместе с тем, динамическая голограмма, сформированная в ортогональной геометрии, остается поляризационно-селективным элементом. Так, в соответствие с выражением (8) линейный сигнал демодуляции исчезает, если объектная волна поляризована линейно вдоль направления p (т.е. когда $a_s = 0$). Поэтому, несмотря на то, что в ортогональной геометрии уровень поляризационного шума снижается за счёт стабилизации постоянной составляющей интенсивности объектной волны, её переменная составляющая остается поляризационно-зависимой. Как следствие, если объектная волна поляризована частично или, более того, линейно или эллиптически, а состояние поляризации при этом нестабильно и/или подвержено влиянию измеряемой величины, сигнал демодуляции в адаптивном интерферометре на основе двухволнового взаимодействия может стохастически флуктуировать.

Показано, 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 с Таблицей 1 носит анизотропный харак-

тер. При этом сигнал демодуляции фазы объектной волны $\Delta I_1(\varphi)$ формируется в результате некогерентного сложения двух составляющих $\Delta I_{12}(\varphi)$ и $\Delta I_{13}(\varphi)$, полученных при попарном взаимодействии объектной волны с каждой из опорных. Показано, что если опорные волны имеют эллиптическую поляризацию с одинаковым направлением вращения, а значения поляризационных компонент их амплитуд удовлетворяют условию: $|b_y/b_z| = |c_x/c_z| \ll 1$, то сигнал демодуляции оказывается независимым от состояния поляризации объектной волны и определяется только её интенсивностью:

$$\Delta I_1(\varphi) \cong \sqrt{2} \kappa_D z \frac{I_1 \sigma^2}{I_1 + I_2 + I_3} \times \varphi. \quad (9)$$

где $\sigma^2 = b_y b_z = c_x c_z$.

На рис.11 представлены результаты экспериментального исследования зависимости амплитуды сигнала демодуляции линейно поляризованной объектной волны от ориентации плоскости её поляризации, выполненного для случаев двухволнового (кривые 1 и 2) и трёхволнового (кривая 3) ортогональных взаимодействий: кривая 1 – объектная волна взаимодействует с опорной \vec{A}_2 , опорная волна \vec{A}_3 «выключена»; кривая 2 – объектная волна взаимодействует с опорной \vec{A}_3 , опорная волна \vec{A}_2 «выключена»; кривая 3 – обе опорные волны «включены». Как видно, в последнем случае величина сигнала демодуляции остаётся постоянной при любом значении угла ζ , что находится в полном соответствии с выражениями (9) и служит экспериментальным подтверждением достижения поляризационной независимости адаптивного интерферометра за счет трёхволнового ортогонального 3D-взаимодействия в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии.

Пятая глава посвящена разработке физических принципов построения многоканальных адаптивных измерительных систем на основе динамических диффузионных голограмм, мультиплексируемых в фоторефрактивном кристалле.

В §5.1 предлагается и исследуется геометрия мультиплексирования отражательных голограмм, в которой исключена или сведена к минимуму возможность появления перекрестных помех между каналами. Объектные линейно поляризованные световые пучки направляются в ФРК кубической симметрии под небольшими углами к его оси [001]; навстречу им вдоль этой же оси направляется общий эллиптически поляризованный опорный пучок (рис.12). Теоретически показано, что в такой геометрии в случае симметричного распространения объектных световых пучков в ФРК относительно главной кристаллографической оси [001], между ними исключено формирование перекрестных голограмм, а уровень перекрестного шума стремится к нулю ($-\infty$ дБ). Это обусловлено тем, что в такой геометрии

волновой вектор перекрестной голографической решётки \vec{K}_{12} перпендикулярен направлению распространения волн и, соответственно, оси [001]; при этом матрица связи волн обращается в нулевую. Нарушение симметрии приводит к появлению перекрестного шума. Вместе с тем, показано (рис.13), что его уровень остается ниже уровня собственных шумов канала (-30 дБ) в пределах широкого диапазона углов распространения объектных световых волн в кристалле ($\pm 20,5^\circ$ для кристалла CdTe). Следует отметить, что даже этот низкий уровень шума становится существенным лишь в предельном случае, когда угол падения объектных волн на поверхность кристалла составляет 90° , что на практике не реализуется.

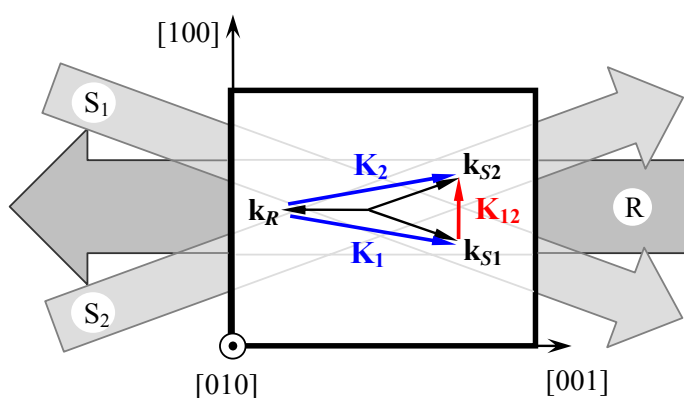


Рис.12. Геометрия мультиплексирования отражательных голограмм

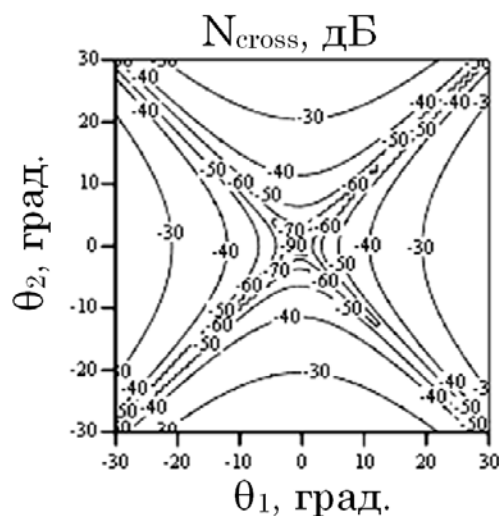


Рис.13. Зависимость уровня перекрестного шума от направлений распространения объектных волн в кристалле CdTe

Выполнено комплексное экспериментальное исследование других возможных механизмов появления перекрестного влияния между каналами, а именно: локальные нарушения симметрии кристалла вследствие наличия дефектов и внутренних механических напряжений; рассеяние световых волн по направлению фотоприёмников соседних каналов; модуляция интенсивности опорного пучка. Показано, что внутренние напряжения в кристалле могут снимать «запрет» на взаимодействие между объектными световыми пучками на голографической решетке \vec{K}_{12} в пропускающей геометрии. Это приводит к появлению перекрестных помех между объектными пучками даже в случае их симметричного распространения относительно оси кристалла [001], однако уровень перекрестного шума между каналами остается низким и не превышает уровня собственных шумов канала.

Приводятся результаты экспериментального исследования влияния количества мультиплексируемых каналов M на чувствительность адаптивного интерферометра в отдельно взятом канале. Показано, что с ростом M уровень сигнала демодуляции в канале снижается вследствие уменьшения контраста интерференцион-

ной картины. Однако в силу низкой интенсивности объектных пучков по сравнению с интенсивностью опорного пучка снижение чувствительности в канале оказывается незначительным. Определен предел мультиплексирования отражательных голограмм. Показано, что в одном кристалле CdTe может быть сформировано свыше 340 голограмм (и реализовано тем самым эквивалентное число адаптивных каналов), при этом относительный порог детектирования в каждом канале снизится не более чем на один порядок.

В §5.2 разрабатываются принципы организации многоканальной адаптивной измерительной системы на основе мультиплексирования ортогональных динамических голограмм в ФРК кубической симметрии. Показано, что ортогональная геометрия формирования динамических голограмм способна обеспечить дополнительное снижение уровня перекрестных шумов, а также повышение предела мультиплексирования каналов без потери чувствительности. Кроме того, упрощается практическая реализация многоканальной системы в силу отсутствия необходимости использования в ортогональной геометрии в тракте объектных пучков поляризационных элементов, а также возможности разнесения пучков в пространстве.

Выполнена практическая реализация 6-ти канального адаптивного волоконно-оптического интерферометра, в котором в качестве сенсоров используются стандартные многомодовые волоконные световоды ($NA = 0,22$; диаметр сердцевины 62,5 мкм), а динамические голограммы формируются в кристалле CdTe в ортогональной геометрии и в диффузионном режиме (рис.14).

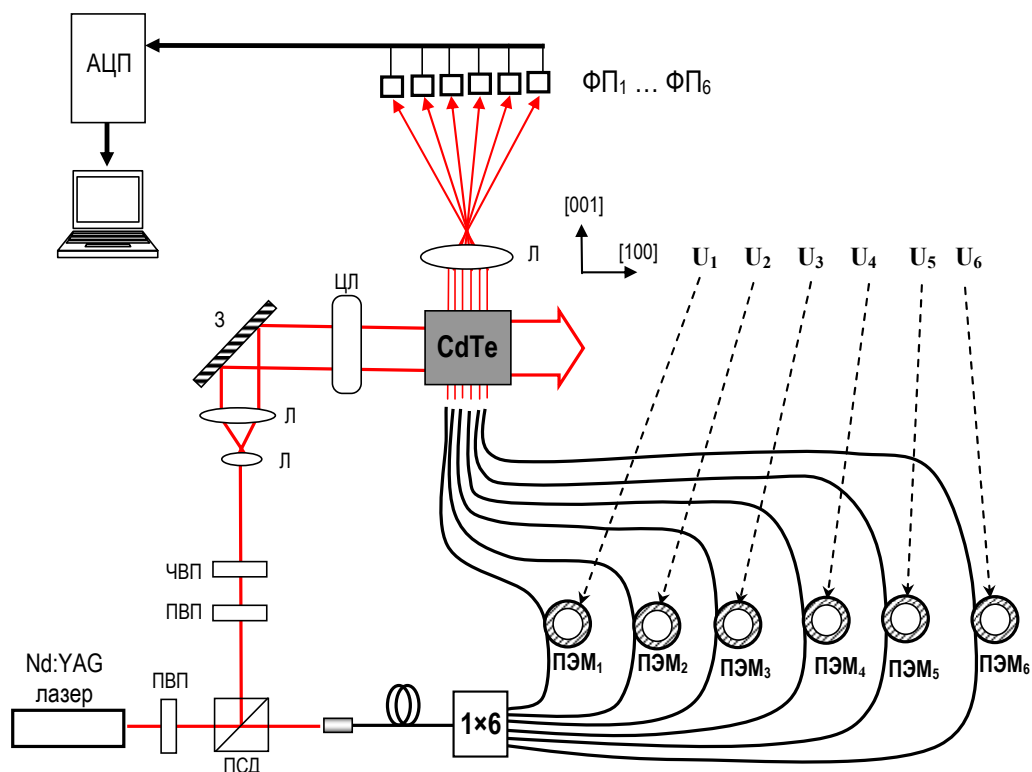


Рис.14. Схема 6-ти канального адаптивного волоконно-оптического интерферометра

На этапе исследования работы системы шесть модуляционных сигналов разной частоты (2; 5,5; 9; 12; 16 и 20,5 кГц) подавались при помощи шести пьезоэлектрических модуляторов на волоконные световоды. Полученные осциллограммы сигналов демодуляции в каждом из 6-ти каналов вместе с их Фурье-спектрами представлены на рис.15. Как видно, в спектре каждого канала содержится только одна компонента на соответствующей частоте модуляции. Компоненты частот других каналов не превышают уровня -30 дБ, либо не детектируется, что служит экспериментальным подтверждением независимости работы каналов.

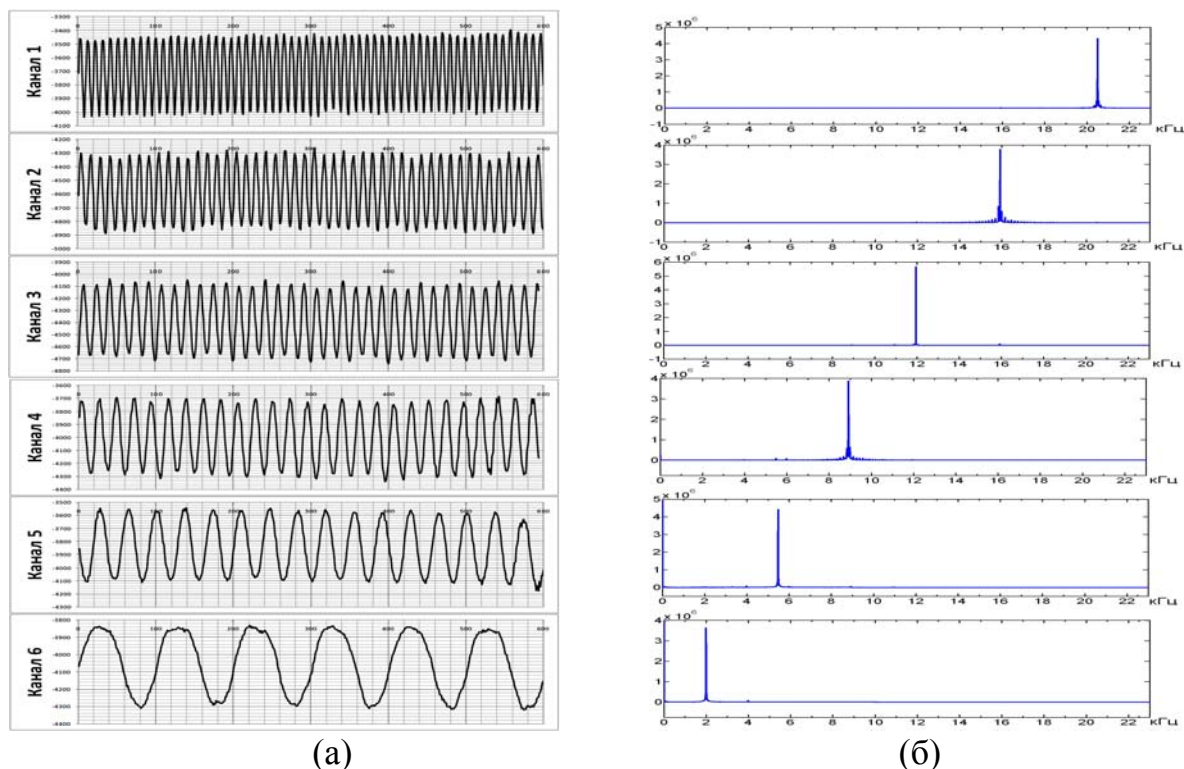


Рис.15. Осциллограммы сигналов демодуляции (а) и их Фурье-спектры (б) в 6-тиканальном адаптивном интерферометре

Двухканальный вариант адаптивного интерферометра был апробирован в задаче детектирования ультразвуковых волн, распространяющихся по образцу, выполненному из полимера.

В §5.3 разрабатываются физические принципы построения многоканального адаптивного коррелятора на основе пространственного мультиплексирования самосогласованных динамических голограмм в ФРК кубической симметрии. В основу работы отдельного коррелятора положено явление самодифракции, проявляющее себя в пропускающей геометрии как эффект фаннинга – самоиндуцированное усиление рассеянных волн. Независимость работы каналов обеспечивается взаимной некогерентностью формирующих их световых пучков.

Выполнено экспериментальное исследование работы двухканальной адаптивной корреляционной измерительной системы, построенной с использованием

кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$. Показано, что при полном перекрытии световых полей в кристалле уровень сигнала демодуляции в отдельном канале уменьшается на 5 дБ. При этом перекрестные помехи не детектируются, оставаясь ниже уровня собственных шумов в канале (-22 дБ). Выполнена оценка предела мультиплексирования самосогласованных голограмм в одном кристалле. Показано, что в одном кристалле с размерами передней грани $1,5 \times 5 \text{ мм}^2$ может быть сформировано до 30 адаптивных каналов демодуляции.

Работа двухканальной адаптивной волоконно-оптической измерительной системы, построенной с использованием голографических корреляторов, мультиплексированных в ФРК, была апробирована в задаче мониторинга процесса трещинообразования в деформируемом твердом теле (рис.16). Два волоконно-оптических сенсора, помещались в исследуемый объект на стадии его изготовления. Механическая деформация объекта, вызванная оказываемым на него постоянно растущим давлением, приводила к появлению трещин, которые в свою очередь инициировали распространение по объекту звуковых импульсов. Достигнув волоконных световодов и воздействуя на них, акустические импульсы вызывали модуляцию фазы излучения, каналируемого по световодам, что детектировалось при помощи двухканального адаптивного голографического коррелятора.

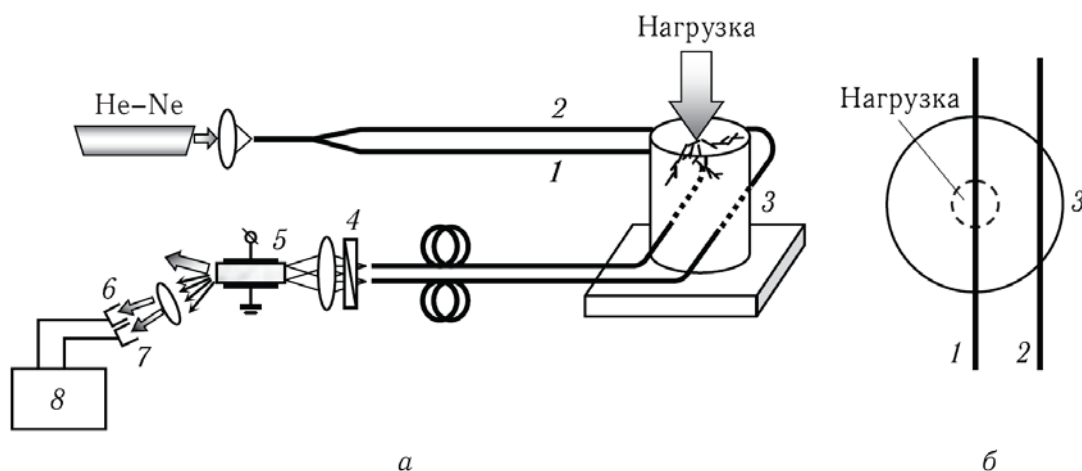


Рис.16. Двухканальная адаптивная волоконно-оптическая измерительная система (а) и положение волоконных световодов внутри тестируемого объекта – вид сверху (б)

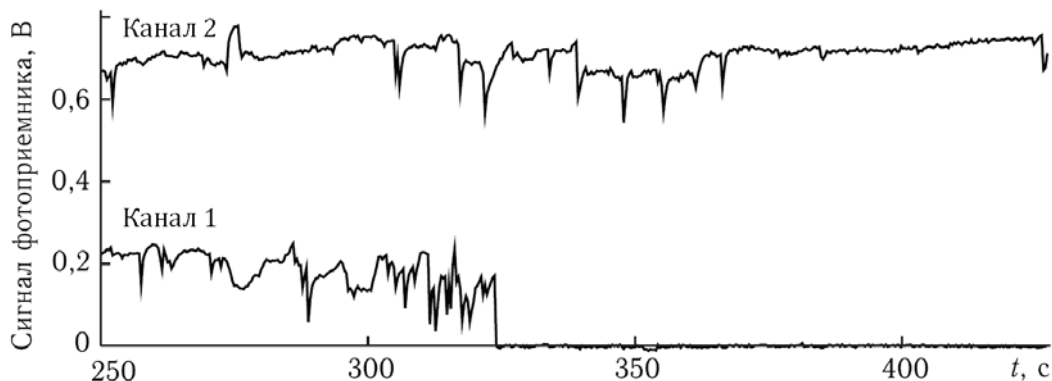


Рис.17. Осциллограммы сигналов в двух каналах адаптивной волоконно-оптической измерительной системы, осуществляющей мониторинг образования трещин в твердом теле

Как видно из полученных осциллограмм (рис.17), оба канала работают независимо, а перекрестные сигналы отсутствуют. При этом адаптивные свойства голографического коррелятора, сформированного в ФРК, позволяют не только исключить воздействие на измерительную систему низкочастотных внешних факторов (как например, дрейф температуры), но и сделать её нечувствительной к медленным деформациям объекта, находящегося под действием постоянно растущей нагрузки, обеспечив тем самым детектирование только моментов появления трещин.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнено исследование процессов векторного взаимодействия когерентных световых пучков с разным типом поляризации на динамических диффузионных голограммах, формируемых в фоторефрактивных кристаллах кубической симметрии (групп 23 и $\bar{4}3m$). Впервые показано, что в коллинеарной геометрии попутного или встречного взаимодействия волн в случае чисто диффузионной записи динамической голограммы линейный режим фазовой демодуляции может быть реализован за счёт использования эллиптически поляризованной и линейно поляризованной волн в условиях анизотропной дифракции.

2. Определены основные параметры адаптивных интерферометров. Даны теоретические основы определения относительного порога детектирования фазы в адаптивном интерферометре, как критерия его чувствительности.

3. Впервые разработаны и экспериментально и теоретически обоснованы принципы построения адаптивных корреляционных и интерферометрических измерительных систем на основе динамических отражательных голограмм, формируемых в фоторефрактивных кристаллах без приложения внешних электрических полей. Показано, что самосогласованная голограмма, формируемая в ФРК в результате интерференции исходного пучка с пучком, частично отраженным от выходной грани кристалла, обеспечивает адаптивную корреляционную фильтрацию пространственных изменений распределения интенсивности спекловой волны. Установлено, что адаптивный коррелятор, используемый в задаче обработки перестроения спеклового поля многомодового волоконного световода (с числовой апертурой $NA=0,21$), вызванного его удлинением, обеспечивает чувствительность не хуже 1,4 дБ/мкм с динамическим диапазоном до 22 дБ.

4. Впервые показано, что использование отражательной геометрии формирования голограммы совместно с обеспечением линейного режима фазовой демо-

дуляции за счёт векторного взаимодействия волн на диффузионной голограмме позволяет реализовать адаптивный интерферометр, чувствительность которого приближается к максимально возможной чувствительности, достижимой лишь теоретически в классическом гомодинном неадаптивном интерферометре, свободном от оптических потерь. Экспериментальное значение относительного порога детектирования для кристалла CdTe составило 5,7, что соответствует абсолютному порогу детектирования $8,5 \times 10^{-9} \text{ рад}(\text{Вт}/\text{Гц})^{1/2}$.

5. Впервые исследован процесс распространения в ФРК сильно сфокусированных световых пучков с гауссовым распределением интенсивности, формирующих динамическую голограмму. Получены аналитические выражения, позволяющие для выбранного кристалла, рабочей длины волны излучения и заданного параметра допустимого расширения пучков в кристалле, рассчитать фокусные расстояния линз, их расположение относительно кристалла, а также угол между световыми пучками, при которых световые пучки максимально сфокусированы в кристалле и при этом полностью перекрываются друг с другом по всей его длине, обеспечивая формирование в ФРК максимально эффективной динамической голограммы с минимальным временем записи при использовании оптического излучения малой мощности. Применение экспериментально реализованной оптимальной фокусирующей системы для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ позволило без потери эффективности взаимодействия волн в 24 раза сократить время записи голограммы за счет 20-ти кратного увеличения плотности оптической мощности, при этом общая мощность, потребовавшаяся для записи голограммы, сократилась в 5 раз.

6. Впервые предложен и обоснован метод снижения поляризационного шума в адаптивном волоконно-оптическом интерферометре, который заключается в использовании в качестве чувствительных элементов многомодовых волоконных световодов с большим диаметром сердцевины. Показано, что увеличение на два порядка числа каналируемых по волоконному световоду мод за счет увеличения диаметра его сердцевины с 50 до 550 мкм позволяет повысить отношение сигнал/шум в адаптивном интерферометре в среднем на 25 дБ. Экспериментально достигнутый абсолютный практический порог детектирования составил $3,0 \times 10^{-8} \text{ рад}\sqrt{\text{Вт}/\text{Гц}}$, что позволяет в реальных (внелабораторных) условиях устойчиво детектировать в широкой полосе частот (до 10 МГц) изменения длины волоконного световода (вызванные, например, механической вибрацией) с амплитудой в диапазоне от 0,2 до 110 нм. На базе адаптивного волоконно-оптического интерферометра ($NA=0,22$) экспериментально реализована схема адаптивного микрофона с чувствительностью 4,3 рад/Па (на частоте 1 кГц), порогом детектирования звукового давления 0,79 мПа (32 дБ) и динамическим диапазоном не менее 55 дБ.

7. Разработаны физические принципы организации новых поляризационно-независимых схем адаптивных интерферометров. Впервые показано, что ортогональная геометрия двухволнового взаимодействия способна обеспечить линейную демодуляцию фазы деполяризованной волны, что позволяет устранить из схемы интерферометра поляризационные фильтры, значительно снизив тем самым оптические потери (до 3 дБ) и устранив наиболее сильный источник появления поляризационного шума. Найдена ассиметричная конфигурация ортогонального двухволнового взаимодействия в ФРК кубической симметрии, в которой только одна из взаимодействующих волн (опорная) испытывает дифракцию, в то время как другая (объектная) не дифрагирует, что позволяет дополнительно снизить потери и повысить чувствительность адаптивного интерферометра на основе ортогональной геометрии взаимодействия.

8. Впервые предложена и экспериментально и теоретически обоснована схема трёхволнового ортогонального 3D-взаимодействия в ФРК кубической симметрии. Показано, что на базе трёхволнового взаимодействия может быть реализован полностью поляризационно-независимый адаптивный интерферометр, в котором объектная волна может иметь произвольное состояние поляризации, что позволяет свести к предельному минимуму поляризационные шумы в адаптивном интерферометре, понизить порог детектирования, увеличить динамический диапазон измерения, а также расширить область практического применения адаптивных интерферометров.

9. Впервые определены и теоретически и экспериментально обоснованы геометрии мультиплексирования отражательных и ортогональных динамических голограмм с использованием общего опорного пучка, в которых за счёт анизотропии векторного взаимодействия в кубическом ФРК исключено или сведено к минимуму формирование перекрестных голограмм и, как следствие, появление перекрестных помех. Показано, что для указанных типов голограмм наиболее оптимальной с точки зрения подавления перекрестного влияния является конфигурация, в которой объектные световые пучки направляются вдоль основной кристаллографической оси кристалла. Выработаны принципы мультиплексирования самосогласованных динамических голограмм за счёт взаимной некогерентности излучения. Оценка предела мультиплексирования, выполненная для каждого типа голограмм, свидетельствует о возможности формирования в одном кристалле свыше 300 отражательных и ортогональных и до 30 самосогласованных голограмм.

10. Впервые предложены и экспериментально исследованы схемы многоканальных сверхчувствительных адаптивных измерительных систем на основе мультиплексирования в ФРК самосогласованных, отражательных и ортогональных го-

лограмм. Созданы макеты двухканального адаптивного коррелятора (динамический диапазон 22 дБ; перекрестные шумы не более –22 дБ) и шестиканального адаптивного измерительного интерферометра (чувствительность не хуже $9,0 \times 10^{-8}$ рад $\sqrt{\text{Вт/Гц}}$ на канал; динамический диапазон не менее 30 дБ; перекрестные шумы не более –30 дБ), работа которых прошла экспериментальную апробацию в задачах мониторинга трещинообразования, а также распространения ультразвуковых волн в твёрдых телах.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wagner J.W., Spicer J. Theoretical noise-limited sensitivity of classical interferometry // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1987. – Vol.4. – №.8. – P.1316-1326.
- [2] Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. – Санкт-Петербург: Наука, 1992. – 320 с.
- [3] Solymar L., Webb D.J., Grunnet-Jepsen A. Physics and applications of photorefractive materials. – Oxford University Press, 1996. – 512 p.
- [4] Ashkin A., Boyd G.D., Dziedzic J.M., Smith R.G., Ballman A.A., Levinstein J.J., Nassau K. Optically-induced refractive index inhomogeneities in LiNbO₃ and Li-TaO₃ // *Appl. Phys. Lett.* –1966. –V.9. – №.1. – P.72-74.
- [5] 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.
- [6] Delaye P., Blouin A., Drolet D., De Montmorillon L.-A., Roosen G., Monchalin J.-P. Detection of ultrasonic motion of a scattering surface using photorefractive InP:Fe under an applied dc field // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1997. – V.14. – №.7. – P.1723-1734.
- [7] Hall T.J., Fiddy M.A., Ner M.S. Detector for an optical-fiber acoustic sensor using dynamic holographic interferometry // *Optics Letters.* – 1980. – Vol.5. – №.11. – P.485-487.
- [8] Frejlich J., Kamshilin A.A., Kulikov V.V., Mokrushina E.V. Adaptive holographic interferometry using photorefractive crystals // *Opt. Commun.* – 1989. – V.70. – №.2. – P.82-86.
- [9] Campagne B., Blouin A., Pujol L., Monchalin J.-P. Compact and fast response ultrasonic detection device based on two-wave mixing in a gallium arsenide photorefractive crystal // *Rev. Sci. Instrum.* – 2001. – V.72. – №.5. – P.2478-2482.

- [10] Ing R.K., Monchalín J.-P. Broadband optical detection of ultrasound by two-wave mixing in a photorefractive crystal // *Appl. Phys. Lett.* - 1991. - V.59. – №.25. - P.3233-3235.
- [11] Ferreira L. A., Santos J. L., Farahi F. Polarization-induced noise in a fiber-optic Michelson interferometer with Faraday rotator mirror elements // *Appl. Opt.* – 1995. – Vol.34. – №.28. – P.6399-6402.
- [12] Kersey A.D., Marrone M.J., Dandridge A. Observation of input-polarization-induced phase noise in interferometric fiber-optic sensors // *Opt. Lett.* – 1988. – Vol.13. – №.10. – P.847-849.
- [13] Stepanov S.I., Petrov M.P. Efficient unstationary holographic recording in photorefractive crystals under an external alternating electric field // *Opt. Commun.* – 1985. - V.53. – №.5. – P.292-295.
- [14] Zhang Z., Ding Y., Eichler H.J., Fu P., Zhou G., Tang J., Shen D., Ma X., Chen J. Improvement of the two-beam coupling response time in photorefractive double-doping KNbO₃ // *Chin. Phys. Lett.* – 1997. – Vol.14. – №.2. – P.103-105.
- [15] Fomitchov P., Murray T.W., Krishnaswamy S. Intrinsic fiber-optic ultrasonic sensor array using multiplexed two-wave mixing interferometry // *Appl. Opt.* – 2002. – V.41. – №.7. – P.1262-1266.
- [16] Qiao Y., Zhou Y., Krishnaswamy S. Adaptive demodulation of dynamic signals from fiber Bragg gratings using two-wave mixing technology // *Appl. Opt.* – 2006. – V.45. – №.21. – P.5132-5142.
- [17] Bilaniuk N. Optical microphone transduction techniques // *Applied Acoustics.* – 1997. – Vol.50. – №1. – P.35-63.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых периодических изданиях¹

- [1] 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.
- [2] Di Girolamo S., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Orthogonal geometry of wave interaction in a photorefractive crystal for linear phase demodulation // ***Opt. Commun.*** – 2010. – V.283. – №.1. – P.128-131.
- [3] Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Multi-channel adaptive interferometry system // ***J. Russ. Laser Research.*** – 2010. – V.31. – №.1. – P.55-60.

¹ Жирным шрифтом выделены издания, входящие в Перечень ВАК РФ

- [4] Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // **J. Appl. Phys.** – 2009. – V.105. – №.3. – P.031101, 1-11.
- [5] Di Girolamo S., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.-C., Kamshilin A.A. Fiber sensors multiplexing using vectorial wave mixing in a photorefractive crystal // **Opt. Express.** – 2008. – V.16. – №.22. – P.18040-18049.
- [6] Шандаров С.М., Буримов Н.И., Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В., Толстик А.Л., Шепелевич В.В. Динамические голограммы Денисюка в кубических фоторефрактивных кристаллах // **Квантовая электроника.** – 2008. – Т.38. - №11. – С.1059-1069.
- [7] Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.-C. Sensing of multimode-fiber strain by a dynamic photorefractive hologram // **Opt. Lett.** – 2007. – V.32. – №.13. – P.1821-1823.
- [8] Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Optimal geometry for fast and efficient hologram recording in photorefractive crystal // **Opt. Review.** – 2007. – V.14. – №.4. – P.176-179.
- [9] Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.-C. Fast adaptive interferometer on dynamic reflection hologram in CdTe:V // **Opt. Express.** – 2007. – V.15. – №.2. – P.545-555.
- [10] Shandarov S.M., Burimov N.I., Dubtsov M.A., Sibagatulina V.G., Baklanov D.S., Kulchin Y.N., Romashko R.V., Kargin Y.F., Egorysheva A.V., Volkov V.V. Polarization effects at two-beam interaction on reflection holographic gratings in sillenite crystals // **Laser Physics.** – 2007. – V.17. – №.4. – P.482-490.
- [11] Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н., Камшилин А.А. Адаптивный интерферометр на основе анизотропной дифракции на фоторефрактивной отражательной голограмме // **Известия РАН: Сер. физ.** – 2006. – Т.70. – №9. – С.1296-1300.
- [12] Гусельникова А.В., Шандаров С.М., Плесовских А.М., Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н. Векторное четырехволновое взаимодействие света на отражательных решетках в кристаллах титаната висмута // **Оптический журнал.** – 2006. – V.73. – №.11. – С.22-27.
- [13] Ромашко Р.В., Шандаров С.М., Кульчин Ю.Н., Буримов Н.И., Лимарев Д.А., Каргин Ю.Ф., Волков В.В. Адаптивный спекл-интерферометр на основе фоторефрактивной отражательной голограммы // **Известия РАН: Сер. физ.** – 2005. – Т.69. – №.8. – С.1143-1145.
- [14] Romashko R.V., Kulchin Y.N., Shandarov S.M., Kargin Y.F., Volkov V.V. Adaptive correlation filter based on dynamic reflection hologram formed in photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystal // **Opt. Review.** – 2005. – V.12. – №.1. – P.58-60.

- [15] Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В., Пискунов Е.Н., Камшилин А.А. Многоканальный корреляционный фильтр на основе фоторефрактивного кристалла для обработки изменяющихся спекловых полей // **Письма в ЖТФ**. – 2000. – Т.26. – №.12. – С.23-27.
- [16] Romashko R.V., Bezruk M.N, Kulchin Y.N. Six-channel adaptive fiber-optic system based on orthogonal holograms multiplexed in a photorefractive crystal // *Pacific Science Review*. – 2010. – V.12. – №.1. – P.12-15.
- [17] Romashko R.V. Adaptive optical microphone on the base of photorefractive crystal // *Pacific Science Review*. – 2010. – V.12. – №.1. – P.16-17.
- [18] Romashko R.V., Kulchin Y.N., Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Launay J.-C. (*invited*) Adaptive fiber-optical sensor system for pico-strain and nano-displacement metrology // *Key Engineering Materials*. – 2008. – V.381-382. – P.61-64.
- [19] Буримов Н.И., Шандаров С.М., Быков В.И., Колегов А.А., Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н., Каргин Ю.Ф., Волков В.В. Двухволновое взаимодействие на динамических отражательных голограммах в кубических фоторефрактивных кристаллах при фазовой модуляции сигнального пучка // *Химия высоких энергий*. – 2008. – Т.42. – №.4п. – С.38-40.
- [20] Romashko R.V., Kulchin Y.N., Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Lee H.-Y. Multichannel adaptive interferometer based on multiplexed photorefractive holograms // *Pacific Science Review*. – 2008. – V.10. – №.2 – P.93-95.
- [21] Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.-C. Multiplexed sensor of dynamic strains using photorefractive wave mixing in the reflection geometry // *Proc. SPIE*. – 2008. – V.7004. – P.70044C, 1-5.
- [22] Romashko R.V., Kulchin Y.N., Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Launay J.-C. // Fast-adaptive fiber-optic sensor for ultra-small vibration and deformation measurement // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2007. – V.85. – P.0120241, 1-8.
- [23] Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Di Giloramo S., Nippolainen E., Launay J.-C., Kamshilin A.A. Fast adaptive interferometer based on CdTe crystal and low power radiation // *Proc. SPIE*. – 2007. – V.6785. – P.678512, 1-7.
- [24] Romashko R.V., Kulchin Y.N., Shandarov S.M., Kamshilin A.A. Adaptive fiber-optical measuring systems // *Pacific Science Review*. – 2007. – V.9. – P.51-55.
- [25] Romashko R.V., Di Giloramo S., Nippolainen E., Launay J.-C., Kamshilin A.A. Adaptive fiber optic interferometer with CdTe crystal for vibrations measurement // *Proc. SPIE*. – V.6345. – P.634516, 1-8.
- [26] Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н. Адаптивные волоконно-оптические измерительные системы // *Вестник ДВО РАН*. – 2006. – №.4. – С.94-99.

- [27] Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Detecting small phase modulation using photorefractive reflection hologram // Proc. SPIE. – 2005. – V.6027. – P.602727, 1-6.
- [28] Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Linear phase demodulation via reflection photorefractive holograms // OSA Trends in Optics and Photonics Series. TOPS. – 2005. – V.99. – P.675-680.
- [29] Kulchin Y.N., Romashko R.V., Shandarov S.M. Adaptive processing of fiber-optic interferometer's signals by dynamic holograms formed in BTO-crystals // Proc. SPIE. – 2005. – V.5851. – P.100-104.
- [30] Romashko R.V., Kulchin Y.N., Shandarov S.M., Burimov N.I., Kargin Y.F., Volkov V.V. Using a self-diffraction of light waves for processing of dynamic speckle patterns // Pacific Science Review. – 2004. – V.6. – №.1. – P.30-34.
- [31] Romashko R.V., Shandarov S.M., Kulchin Y.N., Burimov N.I., Limarev D.V., Kamenev O.T., Mandel A.E., Kargin Y.F., Volkov V.V. Reflection photorefractive holograms in fiber-optical interferometer systems // Pacific Science Review. – 2003. – V.5. – №.1. – P.38-41.
- [32] Kulchin Y.N., Romashko R.V., Kamenev O.T. Using photorefractive crystals for adaptive processing of signals of fiber-optical measuring systems // Proc. SPIE. – 2003. – V.5129. – P.168-175.
- [33] Kulchin Y.N., Romashko R.V., Piskunov E.N., Kamenev O.T. Frequency response of adaptive correlation filter based on photorefractive crystal // Pacific Science Review. – 2002. – V.4. – №.1. – P.67-71.
- [34] Kulchin Y.N., Romashko R.V., Piskunov E.N. Multi-channel adaptive fiber-optical system for monitoring of fast processes in solid state // Proc. SPIE. – 2001. – V.4513. – P.12-17.
- [35] Kulchin Y.N., Vitrik O.B., Vitrik Y.I., Petrov Y.S., Romashko R.V., Piskunov E.N. Fiber-optical interferometric methods for investigation of deformations of building structure // Proc. SPIE. – 2001. – V.4416. – P.58-61.
- [36] Kulchin Y.N., Romashko R.V., Vitrik O.B., Kamenev O.T., Piskunov E.N. Adaptive correlation filters in fiber-optical measuring systems // Proc. SPIE. – 2001. – V.4357. – P.130-140.
- [37] Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В., Каменев О.Т. Измерение динамики градиентов физических полей в реальном времени с помощью адаптивной волоконно-оптической измерительной системы // Оптико-электронные информационно-энергетические технологии. – 2001. – Т.2. – С.178-182.

- [38] Kulchin Y.N., Romashko R.V., Kamenev O.T. Method of measuring physical field gradient by adaptive fiber optic system // Pacific Science Review. – 2001. – V.3. – №.1. – P.9-12.
- [39] Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В., Каменев О.Т., Петров Ю.С., Ляхова Л.П., Никитин Н.В. Метод обработки динамических интерференционных полей на основе явления фоторефракции // Труды Дальневосточного государственного технического университета. – 1999. – Т.122. – С.109-111.

Монографии

- [40] Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Камшилин А.А., Ромашко Р.В. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей. – М.: Физматлит, 2009. – 288 с.

Патенты

- [41] Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н., Шандаров С.М., Агеев Е.Ю., Буримов Н.И. Способ адаптивной обработки оптических сигналов // **Патент РФ** на изобретение. – №2279113. – Дата регистрации в Государственном реестре 27.06.2006. – Приоритет от 22.11.2004.
- [42] Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н., Камшилин А.А. Энергонезависимое адаптивное устройство линейной демодуляции фазы // **Патент РФ** на полезную модель. – № 75760. – Дата регистрации в Государственном реестре 20.08.2008. – Приоритет от 07.04.2008.
- [43] Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н., Камшилин А.А. Поляризационно независимое адаптивное устройство линейной демодуляции фазы // **Патент РФ** на полезную модель. – № 92731. – Дата регистрации в Государственном реестре 27.03.2010. – Приоритет от 26.10.2009.

Ромашко Роман Владимирович

Физические основы построения сверхвысокочувствительных
адаптивных измерительных систем на основе динамических
голограмм

Автореферат

Подписано к печати 18.02.2010 г.
Формат 60×84/16

Усл. п. л. 2,0
Тираж 100.

Уч. изд. л. 1,7
Заказ 15

Издано ИАПУ ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Радио , 5
Отпечатано участком оперативной полиграфии ИАПУ ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5