

На правах рукописи



ЕГОРОВ ФЁДОР АНДРЕЕВИЧ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МИКРООПТОМЕХАНИЧЕСКИХ
РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ С ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Фрязино - 2017

Работа выполнена во Фрязинском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

Научный консультант: **Потапов Владимир Тимофеевич**, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Горшков Борис Георгиевич**, доктор технических наук, и.о. вед. научн.сотруд. лаб. биофотоники отдела светоиндуцированных поверхностных явлений Центра естественно-научных исследований ФГБУН Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Малыкин Григорий Борисович, доктор физико-математических наук, вед.научн. сотруд. Отделения нелинейной динамики и оптики отдела нанооптики и высокочувствительных оптических измерений ФГБУН Федерального исследовательского центра Института прикладной физики РАН.

Наний Олег Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики спектроскопии и физики наносистем ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова».

Ведущая организация:

ФГБУН Научный центр волоконной оптики РАН (НЦВО РАН).

Защита диссертации состоится 16 июня 2017 г. в 10-00, на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, г. Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д.11, корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН и на сайте:

<http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Egorov/index.html>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Потапов Александр
Алексеевич

Актуальность темы. В последние годы на стыке мехатроники, волоконной оптики и лазерной физики начало формироваться новое научно-техническое направление, связанное с разработкой новых методов и устройств управления характеристиками оптического излучения, в которых ключевую роль играет оптомеханическое взаимодействие (ОМВ). В основе таких устройств лежат микрооптомеханические резонансные системы с микро – (нано) масштабами размеров (МОМРС - микроосцилляторы), которые с позиций теории упругости представляют собой колебательные системы с распределенными параметрами, характеризующиеся широким набором мод собственных упругих колебаний, возбуждаемых за счет энергии оптического излучения. ОМВ может обуславливаться как пондеромоторным действием излучения (давление света, оптическая «градиентная» сила и др.), так и параметрическими эффектами (фототермический, радиометрический, электрострикция в поле световой волны и др.), которые в силу универсального характера проявляются в широком спектральном диапазоне в известных и в новых синтезируемых материалах с качественно новыми свойствами. Это открывает перспективы развития фундаментальных [1,2] и прикладных исследований, направленных на разработку новых методов квантово-оптической обработки информации, создание вычислительных и информационно-измерительных систем нового поколения [3-6].

Оптическое возбуждение упругих волн и колебаний в МОМРС приводит к самомодуляции световой волны с нелинейной зависимостью характеристик от интенсивности – оптомеханической нелинейности (ОМН), характеризующейся: низким порогом нелинейности; резонансным характером глубины модуляции вблизи собственных частот МОМРС; возможностью одновременной модуляции нескольких параметров световой волны (амплитуды, фазы, частоты, диаграммы направленности, состояния поляризации); широким спектральным диапазоном, существенно отличающих ее от нелинейностей, обусловленных эффектом Керра или насыщением поглощения, широко используемых в оптических квантовых генераторах (ОКГ – лазерах) для пассивной модуляции характеристик оптического резонатора.

Обмен энергией между оптическими и механическими модами в оптических резонаторах на основе МОМРС, накачиваемых когерентным (лазерным) излучением приводит к автоколебаниям [3,7,8]; к преобразованию спектра излучения [8,9]; к проявлениям квантовых свойств макрообъекта – микроосциллятора [10]; трансформации теплового движения и динамическому охлаждению до сверхнизких температур [11], открывающих новые возможности для исследований в таких областях как квантовая макрофизика и оптика, мезоскопика, информатика, физическое материаловедение, включая физико-химические свойства биологических микро-(нано)объектов и структур [12].

Оптическая связь между МОМРС и лазерным источником в силу высокой чувствительности ОКГ к обратноотраженному (рассеянному) излучению в рассматриваемых системах играет определяющую роль [13]. В работах [14-16] показано, что взаимодействие МОМРС с излучением эрбий-иттербиевых (Er-Yb) волоконных лазеров (ВЛ) приводит к автоколебаниям с синхронной модуляцией интенсивности генерируемого излучения, при этом параметры автоколебаний в пределах области их существования зависят от характеристик как лазерной подсистемы так и микроосциллятора, играющего роль нелинейного зеркала активного (лазерного) резонатора. Это открывает новые возможности для управления режимами генерации и параметрами лазерного излучения, исследования свойств активной среды, характеристик резонатора, кроме того, с учетом высокой точности измерения частоты – для развития бесконтактных методов исследования физических свойств (опто-акустических, упруго-механических, термодинамических) микро - (нано)объектов и пленочных структур, разработки новых типов резонансных волоконно-оптических датчиков (ВОД) физических величин.

Следует отметить, что круг явлений, исследованных в работах [13-16] ограничен частным случаем резонанса – совпадения собственной частоты микроосциллятора с синфазной частотой релаксационных колебаний – лишь одной из множества характерных частот в лазерах, при этом в экспериментах использован только один тип лазеров - эрбий-иттербиевые ВЛ (ЭИВЛ), в которых роль микроосциллятора ограничена функцией зеркала резонатора.

В этой связи необходимо отметить, что разнообразие мод собственных колебаний различных типов МОМРС в сочетании с существенно различными динамическими свойствами лазеров разных классов (А,В,С,Д по динамической классификации [17]) открывают широкие возможности для реализации разнообразных внутренних резонансов в лазерных системах с МОМРС, которые, по существу, играют роль внутрирезонаторных нелинейных элементов в активных резонаторах лазеров. Особый интерес представляет исследование динамики систем в условиях совпадения собственных частот МОМРС с характерными частотами синфазных и антифазных релаксационных колебаний; межмодовых и поляризационных биений; частот комбинационного взаимодействия мод и т.д., которые могут приводить к режимам синхронизации («затягивания»), эффекту стабилизации частоты лазерных импульсов, представляющих интерес с точки зрения создания высокостабильных источников лазерного излучения. Следует отметить, что несмотря на то, что взаимодействия различных видов колебаний в лазерах (вынужденных, релаксационных, автомодуляционных, параметрических, комбинационных) изучены весьма детально [17-23], однако класс явлений, обусловленных внутрирезонаторной оптомеханической нелинейностью в лазерных системах в условиях внутренних резонансов исследован явно недостаточно. Именно развитие технологий мехатроники, волоконной оптики и лазеров (в особенности – волоконных лазеров) открыло возможности для систематических экспериментальных исследований в данной области, сформировало «платформу», на базе которой возможно создание различных волоконных, интегрально-оптических элементов и схем, в которых ключевую роль играет ОМВ. Воспроизводимость и прогнозируемость их характеристик открывает перспективы создания устройств, представляющих практический интерес.

В активных резонаторах на основе МОМРС модуляция параметров (пассивная), обусловленная оптомеханическим взаимодействием позволяет реализовать лазерную генерацию в принципиально новых режимах: в лазерах с зеркалами на основе МОМРС в силу нестационарности резонатора и доплеровского сдвига частоты света, отраженного от МОМРС в принципе не существует мод, так что состояние поля в режиме генерации описывается с помощью

бесконечного ряда сложных пространственно - временных структур [24]; в ВЛ на основе активных микросветоводов (АМС) с переменными условиями отражения света на границах, обусловленными лазерным возбуждением изгибных колебаний АМС, возможна пассивная модуляция ключевого параметра АМС - спонтанного времени жизни; большой интерес представляют исследования динамики лазеров с составными резонаторами, образованными внешними отражателями в виде микроосцилляторов, движущихся под действием генерируемого излучения, которые затрагивают новые аспекты фундаментальной проблемы, связанной с явлениями синхронизации в автодинных системах [25].

Особый интерес с точки зрения реализации внутренних резонансов и эффективного оптомеханического взаимодействия в лазерных системах с МОМРС представляют волоконные лазеры [36-39], которые благодаря уникальным физико - техническим свойствам, особенностям конструкции с учетом широкого выбора активных световодов обеспечивают: возможности изменений в широких пределах характерных частотно - временных параметров, охватывающих диапазон собственных частот МОМРС; вариации в широких пределах энергетических характеристик; оптимальное согласование мод оптического резонатора с МОМРС (в особенности - волноводных); возможности управления спектральным и модовым составом, состоянием поляризации излучения и т.д., позволяющих сформировать многомерное пространство регулируемых параметров, определяющих состояние лазерной системы. Благодаря этому ВЛ являются оптимальными модельными объектами для исследования динамики лазерных систем с МОМРС, при этом особенности, обусловленные спецификой ВЛ представляют самостоятельный интерес, т.к. позволяют: получить новые данные о фундаментальных свойствах ВЛ, активной среды; разработать на основе МОМРС новые функциональные элементы и устройства для управления параметрами излучения ВЛ; создать перспективный класс резонансных ВОД (с частотным выходом). Для этого необходимо проведение комплексных исследований, связанных: с изучением динамики ВЛ-МОМРС в условиях модуляции параметров системы и внешних воздействий, влияния естественных и технических флуктуаций; с поиском новых эффективных механизмов оптического возбуждения МОМРС;

разработкой и исследованием ВЛ с внутрирезонаторными волноводными МОМРС на основе новых видов активных и пассивных световодов, что делает актуальной разработку физических основ и методов создания многофункциональных микроосцилляторов в оптоволоконном исполнении на основе специальных световодов, играющих роль как внутрирезонаторных нелинейных оптических элементов, так и сенсорных элементов ВОД.

Таким образом, изучение оптико-физических свойств МОМРС, механизмов возбуждения их оптическим излучением и особенностей колебаний, обусловленных внутренними резонансами в условиях лазерного возбуждения, являются актуальной задачей.

Объектом исследований в настоящей работе являются микрооптомеханические резонансные системы, возбуждаемые светом и лазерные системы на основе волоконных лазеров с внутрирезонаторными МОМРС; **предметом рассмотрения** являются физические и математические модели взаимодействия МОМРС с излучением волоконных лазеров, режимы автоколебаний в лазерных системах с внутрирезонаторной оптомеханической нелинейностью в условиях внутренних резонансов.

Целью работы является исследование оптико-физических свойств микрооптомеханических резонансных систем различных типов, их взаимодействия с лазерным излучением в условиях внутренних резонансов, приводящих к автоколебательным режимам генерации волоконных лазеров и создания на их основе нового класса резонансных волоконно-оптических датчиков физических величин.

Задачи работы:

1. Анализ особенностей распространения света, оптико-физических свойств и механизмов лазерного возбуждения упругих (акустомеханических) колебаний микрооптомеханических резонансных систем разных типов (волноводных, микрооптических), разработка физических и математических моделей микроосцилляторов.

2. Разработка микрооптических и волноводных МОМРС на основе: кремниевых структур; сегментов специальных световодов, волоконных SMS-структур (single mode – multimode – single mode) и исследование их основных характеристик.

3. Исследование статической и динамической неустойчивости волноводных МОМРС на основе микро-(нано)световодов с интенсивным излучением; параметрического возбуждения мод собственных изгибных колебаний и автоколебаний микросветоводов с интенсивным излучением.

4. Разработка физических и математических моделей взаимодействия лазерного излучения с МОМРС, численное моделирование процессов генерации волоконных лазеров с МОМРС в приближениях точечной и распределенной систем.

5. Исследование режимов пассивной модуляции добротности и синхронизации мод волоконных лазеров с микроосцилляторами; особенностей автоколебаний, обусловленных одновременным взаимодействием лазерного излучения с несколькими микроосцилляторами.

6. Исследование динамики состояния поляризации лазерного излучения в ВЛ-МОМРС в условиях поляризационной зависимости оптомеханического взаимодействия в МОМРС; режимов автоколебаний направления поляризации лазерного излучения.

7. Исследование структуры зон возбуждения и зависимостей параметров автоколебаний от основных характеристик МОМРС и ВЛ; зависимости автоколебаний от внешних воздействий на МОМРС и ВЛ. Выявление основных факторов, определяющих флуктуации параметров автоколебаний, разработка методов повышения стабильности характеристик автоколебаний лазерных систем.

8. Исследование особенностей автоколебаний в ВЛ-МОМРС в условиях пассивной модуляции времени жизни метастабильного уровня в активном световоде с переменными граничными условиями; влияния спонтанного излучения на параметры автоколебаний.

9. Исследование динамики ВЛ-МОМРС в режимах вынужденных и свободных колебаний микроосцилляторов; явления параметрического усиления в ВЛ в условиях модуляции накачки АС и вынужденных колебаний микроосциллятора.

10. Разработка высокочувствительных ВОД перемещений с суб-пикаметровым разрешением и исследование с их помощью флуктуационных колебаний МОМРС. Исследование путей создания резонансных ВОД с термофлуктуационным возбуждением мод собственных колебаний микроосцилляторов. Разработка резонансных

ВОД на основе лазерных систем ВЛ-МОМРС, методов их мультимплексирования, исследование основных характеристик лабораторных макетов ВОД физических величин (силы, деформаций, температуры, давления и т.д.).

Методы исследований. Теоретические исследования базируются на принципах и достижениях следующих научных дисциплин: теория колебаний, теория упругости, лазерная физика, оптика, волоконная оптика, математическая физика, численные методы, физическая акустика, нелинейные колебания.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием стандартных контрольно-измерительных приборов и методик измерений; натурных испытаний; специально разработанных типов высокоточных, многофункциональных установок и устройств для создания и исследований характеристик новых типов МОМРС и ВЛ. Использовались цифровые методы обработки экспериментальных данных и их отображения с помощью специальных программ, обеспечивающих минимизацию погрешностей обработки.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней впервые:

1. Обнаружено и исследовано явление резонансной автомодуляции интенсивности излучения волоконного лазера с внутривибраторной оптомеханической нелинейностью, заключающееся в том, что при совпадении частоты релаксационных колебаний в ВЛ с собственной частотой моды упругих колебаний оптоволоконного микроосциллятора, являющегося составной частью волоконного резонатора ВЛ, в лазере устанавливается режим устойчивых автоколебаний с собственной частотой моды упругих колебаний микроосциллятора, возбуждаемых лазерным излучением.

2. Предложена «гидродинамическая» модель взаимодействия микросветовода с распространяющимся интенсивным излучением, с помощью которой исследована статическая и динамическая неустойчивости оптоволоконных МОМРС на основе микросветоводов. Получены приближенные формулы, описывающие зависимости критической силы Эйлеровой неустойчивости и собственных частот мод поперечных колебаний микросветоводов от мощности излучения, установлена возможность параметрического возбуждения мод изгибных колебаний. Показано, что в консольных микросветоводах с

непрерывным излучением возможны автоколебания по второй моде изгибных колебаний.

3. Предложены и исследованы волноводные МОМРС на основе волоконно-оптических SMS-структур (single mode-multi mode-single mode); световодов с микро-(макро) изгибами, туннелированием света; специальных световодов с локализованными модами упругих колебаний, проявляющих «краевой» резонанс.

4. Разработаны физические и математические модели взаимодействия МОМРС с излучением ВЛ, рассматриваемых как распределенные системы. Показана возможность существования регулярных одно - и двухчастотных режимов автоколебаний, хаотизации автоколебаний.

5. Изучены режимы пассивной модуляции добротности и пассивной синхронизации мод ВЛ, осуществляемых с помощью МОМРС. Реализованы автоколебательные режимы в ВЛ-МОМРС в условиях внутреннего комбинационного резонанса, зависящего от собственной частоты МОМРС, частоты межмодовых биений и релаксационных колебаний в ВЛ.

6. Показано, что поляризационная зависимость взаимодействия МОМРС с излучением волоконного лазера в условиях резонанса собственных колебаний МОМРС с биениями поляризационных «супермод», приводит к автоколебаниям направления поляризации лазерного излучения – к чередованию собственных ортогональных состояний поляризации с частотой собственных колебаний микроосциллятора.

7. Установлено, что пассивная модуляция спонтанного времени жизни в активном световоде, обусловленная вариацией граничных условий АС при изгибных колебаниях, возбуждаемых лазерным излучением, приводит к изменению порога возбуждения и параметров автоколебаний в ВЛ-МОМРС.

8. Исследованы особенности динамики ВЛ-МОМРС, обусловленные модуляцией накачки, показано, что в условиях параметрического резонанса возможно избирательное увеличение чувствительности ВЛ-МОМРС к гармонической составляющей вынужденных колебаний микроосциллятора на заданной частоте.

9. Выявлены основные факторы, определяющие флуктуации параметров автоколебаний в ВЛ-МОМРС, получены оценки

кратковременной нестабильности частоты; показана возможность создания резонансных ВОД, основанных на термофлуктуационном возбуждении собственных колебаний МОМРС.

10. Предложены: методы возбуждения и регистрации свободных, вынужденных колебаний микроосцилляторов в лазерных системах ВЛ-МОМРС, основанные на инерции активной среды и суперфлуоресцентного излучения в условиях модуляции излучения накачки; способы реализации многоканальных резонансных ВОД на основе ВЛ-МОМРС с частотным разделением измерительных каналов.

Практическая значимость работы

1. Разработаны новые методы управления режимами генерации лазеров, параметрами лазерного излучения; разработана лабораторная технология изготовления оптоволоконных МОМРС на основе SMS-структур и сегментов специальных световодов, позволяющих реализовать предложенные методы.

2. Результаты исследований являются основой для создания нового класса резонансных ВОД физических величин в полностью волоконном исполнении, характеризующихся повышенной помехоустойчивостью и большим динамическим диапазоном измерений. Разработаны численные модели, позволяющие определить оптимальные конструктивные параметры, необходимые для создания ВОД с прогнозируемыми характеристиками.

3. Предложены и разработаны способы сопряжения кремниевых МОМРС с кварцевыми волоконными световодами, обеспечивающие высокую механическую прочность соединения и эффективную оптическую связь между ними со стабильными характеристиками в широком диапазоне температур ($-100 \div +500^\circ\text{C}$).

4. Созданы волоконно-оптические системы контроля напряженно-деформированного состояния элементов конструкций и упругих сред, прошедшие апробацию в промышленности в качестве составной части автоматизированных информационно-измерительных комплексов, осуществляющих мониторинг технического состояния строительных сооружений. Особенности способов измерения и устройств защищены патентами РФ.

ВОД деформаций, разработанные на основе результатов диссертационной работы и функционирующие в составе системы мониторинга инженерных конструкций уникального спортивного

комплекса «Уральская Молния» (г. Челябинск), позволили своевременно выявить и количественно оценить перегрузки элементов несущих конструкций под действием ударной волны от **Челябинского метеорита (15.02.2013г.)** [56], что имело решающее значение при определении характера и объема ремонтно-восстановительных работ.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты анализа и исследований механизмов лазерного возбуждения упругих колебаний и волн в микрооптомеханических резонансных системах с поляризационно-анизотропными свойствами, позволившие реализовать режим регулярных автоколебаний направления поляризации излучения волоконного лазера с резонансной частотой микроосциллятора.

2. Оптомеханическая нелинейность МОМРС, резонансные частоты которых совпадают с межмодовым интервалом оптического резонатора, позволяет реализовать пассивную синхронизацию продольных (поляризационных) мод волоконного лазера с микроосциллятором. В пределах области синхронизации период лазерных импульсов зависит как от частоты межмодового интервала, так и собственной частоты микроосциллятора. Возможно переключение режимов пассивной синхронизации мод ВЛ с одним и тем же микроосциллятором за счет реализации резонансных условий с различными модами упругих колебаний путем дискретного изменения всего лишь одного параметра в лазерной системе – длины резонатора.

3. Экспериментальная реализация режима регулярных автоколебаний излучения лазера с собственной частотой микроосциллятора в условиях комбинационного резонанса, когда разность частот межмодовых биений волоконного лазера и собственных частот микроосциллятора кратна частоте релаксационных колебаний ВЛ. Автоколебания имеют место при длинах лазерного резонатора, по крайней мере, до 2,5 км.

4. В волоконных лазерах оптическое возбуждение собственных изгибных колебаний световода, приводящее к модуляции потерь с частотой релаксационных колебаний в ВЛ, приводит к автоколебаниям интенсивности излучения волоконного лазера с собственной частотой изгибных колебаний световода. Пассивная модуляция спонтанного времени жизни в активном световоде (АС), граничащем с отражающей

поверхностью, в условиях лазерного возбуждения изгибных волн в АС, существенно определяет условия возбуждения и параметры автоколебаний и может приводить к повышению стабильности частоты автоколебаний.

5. Включение в волоконный лазер в качестве составного зеркала нескольких микроосцилляторов, резонансных с релаксационными колебаниями в ВЛ, приводит к существованию режима двухчастотных автоколебаний с Фурье-спектром интенсивности, содержащим, наряду с парциальными частотами, компоненту с разностной частотой микроосцилляторов. Критическое значение расстройки для режима двухчастотных автоколебаний зависит от соотношения значений парциальных частот в лазерной системе.

6. Критическая сила Эйлеровой неустойчивости и собственные частоты поперечных колебаний микро-(нано)световода зависят от мощности распространяющегося в нем излучения, модуляция которого приводит к параметрическому возбуждению собственных поперечных колебаний микросветовода. В консольном микросветоводе с непрерывным излучением возможны автоколебания по второй (и более высоким модам) собственных изгибных колебаний. В силу безынерционности и универсальности давления света параметрическое возбуждение колебаний не накладывает жестких ограничений на частотный диапазон и оптико-физические свойства материалов микросветоводов.

7. Применение термостабильных микроосцилляторов с механической добротностью $Q \geq 100$ позволяет при нормальных условиях получать автоколебания интенсивности излучения волоконного лазера с кратковременной относительной нестабильностью частоты, не превышающей $2 \cdot 10^{-6}$.

8. Методы и лабораторные технологии формирования оптоволоконных микроосцилляторов на основе специальных световодов и высокоточного измерения параметров модуляции лазерного излучения, основанного на параметрическом усилении сигналов в волоконных лазерах за счет модуляции накачки, позволили создать новые типы резонансных ВОД в полностью волоконном исполнении, основанные на регистрации термофлуктуационных резонансных колебаний микроосцилляторов, что обеспечивает

минимальную составляющую погрешности, обусловленную неизохронностью собственных колебаний микроосцилляторов.

9. В лазерных системах ВЛ-МОМРС с инерционной активной средой: $\tau_{sp} \cdot f \gg 1$, параметры свободных и вынужденных колебаний МОМРС, возбуждаемых модулированным излучением накачки, можно определить с помощью суперфлуоресцентного зондирующего излучения, оптическое усиление которого при повторном прохождении через АС повышает точность измерения.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на: 13-ой Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях», ММТТ-2000, г. Санкт-Петербург, 2000г.; LV - ой научной сессии, посвященной Дню радио, г. Москва, 2000г.; XXVIII и XXIX Международных конференциях «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе», IT-SE 2001, IT-SE 2002, Ялта – Гурзуф, 2001, 2002 гг.; LVII Научной сессии, посвященной Дню радио, Москва 2002г.; 17-й Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-17, г. Кострома, 2004г.; Международной научно-технической конференции «Датчики и системы – 2005», г. Пенза, 2005г.; Всероссийских конференциях по волоконной оптике, г. Пермь, 2009, 2011, 2013, 2015гг.; IV, V, VI, VII Российских семинарах по волоконным лазерам, г. Ульяновск, 2010г.; г. Новосибирск 2012, 2014, 2016гг.; Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (REDS – 2016), г. Москва, 2016г.; Международной конференции «Фотоника и информационная оптика», г. Москва, НИЯУ МИФИ, 2017г.

Достоверность результатов диссертации обеспечена повторяемостью экспериментальных данных, полученных в различных сериях измерений и согласием результатов экспериментов, выполненных по различным методикам с использованием современных высокоточных измерительных средств; согласием результатов экспериментальных и теоретических исследований, полученных с использованием адекватных моделей и апробированных методов расчета; непротиворечивостью известным научным положениям и фактам; подтверждением опубликованными данными

других авторов (в тех случаях, когда сравнение оказывается возможным); обсуждением результатов исследования на ряде международных и всероссийских научных конференций, публикациями в рецензируемых научных изданиях.

Личный вклад автора

Представленные в диссертации результаты получены лично автором или при его определяющем участии в выборе направления исследований, постановке задачи, обсуждении результатов.

Вклад автора в основные результаты работы: исследование динамики волоконных лазеров с микроосцилляторами в условиях поляризационно анизотропных резонаторов; флуктуационных колебаний в лазерных системах ВЛ-МОМРС проводились автором лично. Проектирование и создание экспериментальных установок и стендов; анализ структуры и конструкции, расчеты и определение оптимальных параметров кремниевых (микрооптических) МОМРС выполнены совместно с В.Т. Потаповым и В.Д.Бурковым; разработка МОМРС на основе оптоволоконных SMS-структур и сегментов специальных световодов, разработка технологии сопряжения кремниевых МОМРС с кварцевым световодом осуществлена автором лично. Разработка теоретических моделей и анализ экспериментальных результатов выполнены совместно с В.Т. Потаповым. Автор имеет основной вклад в постановку задачи, проведение экспериментов и анализ результатов исследований автоколебаний в волоконных лазерах в режиме пассивной синхронизации мод. Исследования в условиях комбинационного резонанса выполнены совместно с сотрудниками НЦВО РАН М.А. Мелькумовым и А.В. Шубиным. Численное моделирование автоколебаний выполнено совместно с Т.В. Потаповым, А.А.Макеевым и В.В. Никитиным (Физический Факультет МГУ им. М.В.Ломоносова), анализ расчетных данных, сравнение с экспериментом выполнены под общим руководством автора. В коллективных публикациях автору принадлежат изложенные в настоящей диссертации результаты.

Исследования по теме «Автогенераторные микрорезонаторные волоконно-оптические датчики физических величин», выполненные с участием соискателя, отмечены дипломом и золотой медалью 50-го Всемирного салона изобретений, научных исследований и

промышленных инноваций «Брюссель – ЭВРИКА –2001» (копия диплома в диссертации прилагается - Приложение G).

Публикации.

По материалам диссертации опубликованы 55 научных работ: **30 научных статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:** 1-«Laser Physics»; 1-«Квантовая электроника»; 10-«Письма в ЖТФ»; 3-«Журнал Технической Физики»; 4-«Радиотехника и Электроника»; 1-«Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия»; 2-«Датчики и Системы»; 1-«Микроэлектроника»; 2-«Радиотехника»; 2-«Лазерная медицина»; 1-«Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика»; 1-«Территория НЕФТЕГАЗ»; 1-«Монтажные и специальные работы в строительстве».

Из них 21 входят в перечень SCOPUS: 1-«Laser Physics»; 1-«Quantum Electronics»; 10-«Technical Physics Letters»; 3-«Technical Physics»; 4-«Journal of Communications Technology and Electronics»; 1-«Moscow University Physics Bulletin»; 1-«Russian Microelectronics».

7 патентов РФ на изобретение; 18 статей в трудах международных, всесоюзных и всероссийских конференций. Объем опубликованных по теме диссертации научных работ в журналах, рекомендованных ВАК РФ – 156 мп.страниц, общий объем опубликованных работ – 272 мп. страницы.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы; содержит 335 страниц основного текста, 91 рисунок, 7 таблиц, список сокращений, 8 приложений. Список литературы содержит 355 ссылок.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее основные цели и задачи. Определены основные направления исследований.

В первой главе изложены физические основы, методы создания, основные свойства МОМРС, позволяющих осуществлять модуляцию и, что особенно важно, самомодуляцию оптического излучения. При этом необходимо подчеркнуть, что самомодуляция излучения обусловлена не оптической нелинейностью среды, а именно ОМВ,

приводящим к оптическому (лазерному) возбуждению колебаний и деформаций поверхностей (границ раздела сред), отражающих (преломляющих) свет; к изменениям напряженно-деформированного состояния МОМРС с соответствующей модуляцией тензора диэлектрической проницаемости материала, к вариациям спектрально - люминесцентных свойств активных центров и релаксационных процессов в них (в МОМРС из активных сред).

Анализ возможных механизмов лазерно-оптического возбуждения упругих колебаний и волн в МОМРС показал, что они основаны на двух принципиально разных группах явлений: 1) непосредственном механическом (пондеромоторном) действии излучения; 2) пространственно-временной модуляции параметров среды (температуры, модуля упругости, плотности вещества и др.), возникающей в результате поглощения света, генерации неравновесных носителей заряда, эффекта фотострикции и др., что, в итоге, приводит к модуляции напряженно-деформированного состояния (НДС) МОМРС. Эффективность возбуждения зависит (наряду с параметрами излучения) от множества факторов: типа моды колебаний, оптико-физических, термо-упругих свойств материалов, конструкции и размеров микроосцилляторов. Показано, что с ростом частоты колебаний и уменьшением размеров МОМРС соотношение эффективностей, в частности, для давления света и фототермического эффекта изменяется в пользу первого. Высказана идея о возможности нового механизма возбуждения поперечных колебаний оптоволоконных МОМРС (рассмотренный в гл.4), основанного на модуляции изгибной жесткости световода под действием модулированного излучения в условиях параметрического резонанса.

Исходя из особенностей динамики лазеров разных классов (А,В,С,Д) [17] определен оптимальный (с точки зрения реализации внутренних резонансов в лазерных системах с МОМРС) класс лазеров (В), включающий несколько групп широко применяемых лазеров (в частности, твердотельные и волоконные лазеры на основе редкоземельных элементов; полупроводниковые (за исключением VCSEL); хорошо известный газовый - CO_2 лазер ($\lambda = 10,6$ мкм.), обоснованы преимущества ВЛ в качестве объекта для исследований внутренних резонансов в лазерных системах с МОМРС.

Предложены физические и математические модели лазерных систем ВЛ-МОМРС, рассмотрены основные допущения и ограничения моделей, приемлемые для широкого класса лазерных систем. Математические модели основаны на уравнениях переноса излучения с учетом пространственной неоднородности АС, при этом микроосциллятор, играющий роль внутриврезонаторного пассивного модулятора или нелинейного зеркала, рассматривается как распределенная колебательная система, которая в рамках теории упругости описывается дифференциальными уравнениями с частными производными. Для МОМРС с вырожденными колебательными элементами (КЭ – однородные стержни, пластины) изложен алгоритм получения упрощенных моделей – систем обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка.

Показано, что в рамках упрощенной модели, в которой ВЛ представлен балансными уравнениями, МОМРС – линейным однорезонансным осциллятором, динамика ВЛ-МОМРС при постоянной накачке описывается (в окрестности положения равновесия) системой уравнений:

$$\ddot{\phi} + \frac{\omega_l}{Q_l} \cdot \dot{\phi} + \omega_l^2 \cdot \phi = -\alpha_n \cdot \beta_n \cdot u - \alpha_U \cdot \dot{u} \quad (1)$$

$$\ddot{u} + \frac{\omega_m}{Q} \cdot \dot{u} + \omega_m^2 \cdot u = \frac{K_\phi}{m} \cdot \frac{(1-r)}{1+R_{20}} \cdot \phi \quad (2)$$

где ϕ – средняя концентрация фотонов в резонаторе ВЛ, u – смещение КЭ; $\omega_l = 2\pi \cdot f_{rel.} = (\alpha_n \cdot \beta_\phi)^{1/2}$ – частота (круговая), $Q_l = \frac{(\alpha_n \cdot \beta_\phi)^{1/2}}{\beta_n}$ – «добротность», характеризующие затухающие релаксационные колебания ВЛ; (α_U) – «крутизна» эффективного оптического усиления в ВЛ (с учетом потерь); m, K_ϕ, ω_m – масса, эффективность лазерного возбуждения колебаний и смещенная частота МОМРС ($|\frac{\omega_m - \omega_0}{\omega_0}| \ll 1$, ω_0 – собственная частота МОМРС):

$$\omega_m = \omega_0 \cdot \left(1 + \frac{(1-r) \cdot K_\phi \cdot \Phi_0 \cdot R_{2U}}{(1+R_{20}) \omega_0^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Уравнения (1-3) описывают автономную систему из двух связанных осцилляторов, моделирующих: релаксационные колебания в лазере (1) и микроосциллятор (2), который, в отличие от моделей [13-16] описывается более точно – с учетом смещения частоты. В условиях

резонанса $\omega_l \approx \omega_m$ в лазерной системе возможны синхронные автоколебания с единой частотой (ω), определяемой действительным корнем уравнения частот:

$$(\omega^2 - \omega_m^2) \cdot (\omega^2 - \omega_l^2) + \frac{(1-r)}{1+R_{20}} \cdot \frac{\alpha_n \beta_n K_\phi}{m} - \frac{\omega_l \omega_m}{Q_l Q_m} \cdot \omega^2 = 0 \quad (4)$$

В зависимости от значений параметров системы, а также знака коэффициента (α_U) автоколебания могут возбуждаться либо на высшей ω_{max} , либо на низшей частоте ω_{min} . Условие существования автоколебаний: $|\alpha_U| \gtrsim |\alpha_U|_{кр}$, где:

$$|\alpha_U|_{кр} \approx \left(\frac{\omega_m}{2Q_m} \cdot (\omega^2 - \omega_l^2) + \frac{\omega_l}{2Q_l} \cdot (\omega^2 - \omega_m^2) \right) \cdot \frac{1+R_{20}}{(1-r)} \cdot \frac{m}{|K_\phi|} \quad (5)$$

Частота автоколебаний составляет:

$$\omega^2 \approx \omega_m^2 - \frac{\left(\frac{\omega_m \omega_l}{Q_m Q_l} \omega_m^2 - \frac{\alpha_n \beta_n K_\phi (1-r)}{m (1+R_{20})} \right)}{(\omega_l^2 - \omega_m^2)} \quad (6)$$

которая тем ближе к частоте микроосциллятора, чем больше его добротность и чем слабее связь (K_ϕ) между ВЛ и МОМРС. Таким образом, микроосциллятор может служить для стабилизации частоты лазерных импульсов в ВЛ-МОМРС (аналог «кварцевой» стабилизации в радиотехнике). Благодаря высокому коэффициенту оптического усиления в ВЛ область возбуждения рассматриваемых автоколебаний в пространстве параметров МОМРС может существенно превышать зону возбуждения известных режимов автоколебаний [3,12].

На основе представлений, рассматривающих генерируемые моды ВЛ в качестве отдельных автогенераторов, связанных посредством общего микроосцилляторного зеркала, сделан вывод о возможности синхронизации мод ВЛ с помощью МОМРС в условиях резонанса вида $f = \Delta\nu$ ($\Delta\nu$ – межмодовый интервал в ВЛ).

Отмечено, что дополнительное конкурентное взаимодействие поляризационных «супермод» в ВЛ, возникающее при использовании поляризационно-анизотропного зеркала на основе МОМРС, открывает новые возможности для управления состоянием поляризации лазерного излучения.

Оценки частот и декрементов затухания релаксационных колебаний в различных типах ВЛ свидетельствуют о возможности

реализации внутреннего резонанса вида $f_{rel.} = f$ (наряду с исследованными ранее ЭИВЛ) в ряде других ВЛ (Nd,Er,Yb,Bi).

Вторая глава посвящена исследованию взаимодействия МОМРС с лазерным излучением в условиях резонанса вида $f_{rel.} = f$. Численное моделирование динамики ЭИВЛ-МОМРС с помощью распределенной модели подтвердило существование режима синхронных автоколебаний, при этом, сравнение полученных результатов с данными «точечной» модели (с тем же ЭИВЛ – МОМРС) показывает, что «точечная» модель приводит к расширению области возбуждения, но, вместе с тем, зависимости частот автоколебаний от параметров систем в общей зоне для указанных моделей практически совпадают.

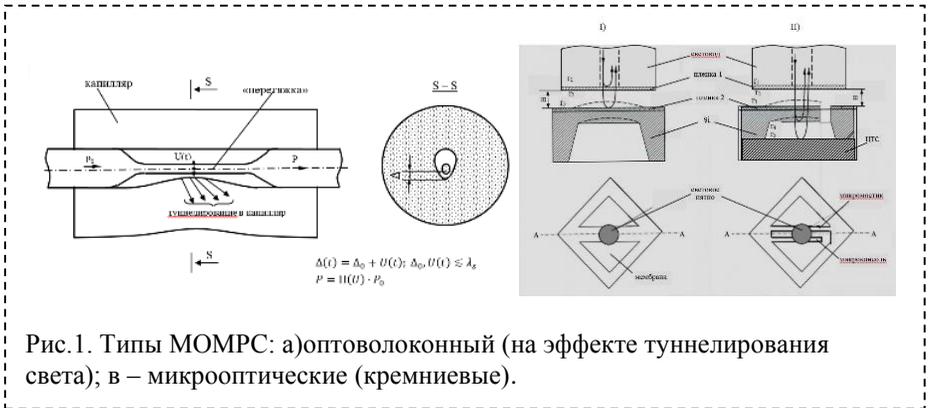


Рис.1. Типы МОМРС: а) оптоволоконный (на эффекте туннелирования света); в – микрооптические (кремниевые).

Экспериментальные исследования динамики ВЛ-МОМРС проведены с использованием разных типов МОМРС (рис.1) и ВЛ (табл.1). Отдельные измерения проведены с помощью одночастотного твердотельного (NdVPO₄) микрочип лазера. Возможность регулировки ряда параметров ВЛ (мощности накачки, параметров резонатора: коэффициентов отражения зеркал, соотношения длин активных и пассивных световодов, полной длины резонатора 0,1÷2,5*10³ м и др.)

Табл. 1

Тип ВЛ	Активная среда, накачка	Конфигурация резонатора	Модовый состав	Зеркала
Эрбий-иттербиевый (Er:Yb)	1) одномодовый активный световод, в сердцевину, $\lambda_p=980$ нм 2) с двойной оболочкой, в ММ оболочку, $\lambda_p=980$ нм 3) GTW – структура, $\lambda_p=980$ нм	линейный, кольцевой, сложный	поперечно одномодовый, многочастотный $\lambda_c=1536-1560$ нм	Металлические пленки, полупроводниковые слои, диэлектрические интерференционные многослойные структуры, волоконные Брэгговские решетки (FBG), «кварцевый световод-воздух»
Эрбиевый (Er)	Одномодовый в сердцевину, $\lambda_p=980$ нм; 1480 нм	Линейный, кольцевой	поперечно одномодовый, многочастотный $\lambda_c \approx 1538$ нм	
Иттербиевый (Yb)	1) GTW – структура, $\lambda_p=976$ нм 2) одномодовый в сердцевину, $\lambda_p=976$ нм	линейный	поперечно одномодовый, многочастотный $\lambda_c \approx 1060$ нм поперечно одномодовый, двухчастотный $\lambda_c \approx 1030$ нм	
Неодимовый (Nd)	1) одномодовый, в сердцевину, $\lambda_p=807$ нм 2) многомодовый, в многомодовую сердцевину, $\lambda_p=807$ нм	линейный	поперечно одно(много)модовый, многочастотный $\lambda_c \approx 1060$ нм	
Микроchip (Nd:VPO)	плоскопараллельная тонкая кристаллическая пластинка, $\lambda_p=810$ нм	линейный	поперечно одномодовый, одночастотный $\lambda_c \approx 1060$ нм	

позволяет сформировать многомерное пространство состояний системы с широким диапазоном энергетических и динамических характеристик ВЛ. Параметры собственных колебаний МОМРС и релаксационных колебаний ВЛ определены с помощью амплитудно и (фазо) – частотных характеристик, измеренных в условиях вынужденных колебаний (активной

модуляции) МОМРС и ВЛ.

Установлено, что в условиях резонанса $f \approx f_{rel.s.}$ ($f_{rel.s.}$ -частота синхронных релаксационных колебаний в лазере), автоколебания имеют место во всех исследованных ВЛ-МОМРС независимо от: типов МОМРС; конфигурации резонатора, системы уровней активной среды (3, 4-х уровневые АС), модового состава, схемы и геометрии накачки, включая ВЛ-МОМРС с нерезонансной обратной связью, реализованной с помощью диффузных отражателей (рис.2). Анализ полученных результатов позволяет заключить, что вывод о существовании синхронных автоколебаний в условиях резонанса $f \approx f_{rel.s.}$ может быть обобщен на весь класс лазеров (В), в которых возможно внутрирезонаторное ОМВ.

Выявлена сложная структура зоны возбуждения автоколебаний в

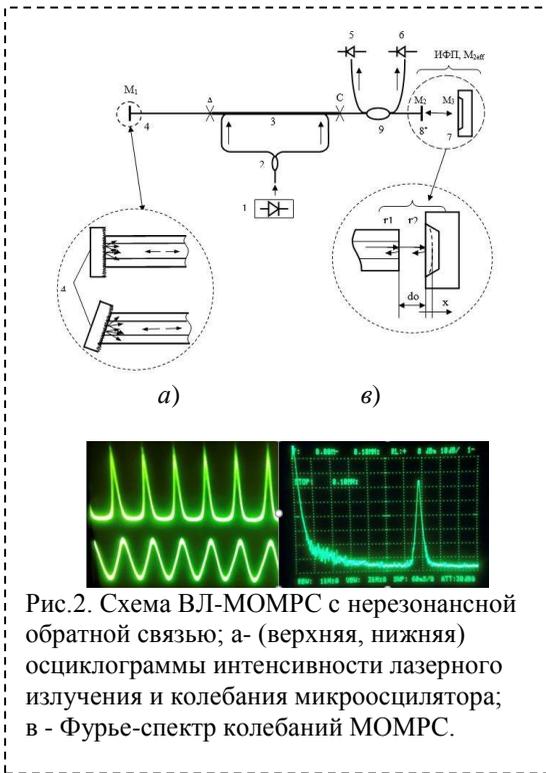
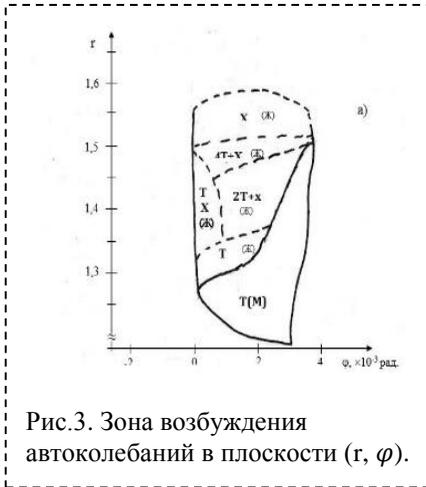


Рис.2. Схема ВЛ-МОМРС с нерезонансной обратной связью; а- (верхняя, нижняя) осциллограммы интенсивности лазерного излучения и колебания микроосциллятора; в - Фурье-спектр колебаний МОМРС.

пространстве параметров системы ВЛ-МОМРС (рис.3), которая включает области параметров с «мягким» (М) и «жестким» (Ж) режимами возбуждения, области удвоения периода автомодуляции интенсивности с дальнейшим переходом к «хаотическому» (Х) режиму (2Т,4Т,...Х) и срыву автоколебаний по мере плавного роста уровня накачки лазера. Теоретически и экспериментально показано, что в условиях резонанса $f \approx f_{rel.a.}$, где $f_{rel.a.}$ - частота антифазных релаксационных биений поляризационных

«супермод», в ВЛ-МОМРС с поляризационно - анизотропным зеркалом на основе МОМРС существуют устойчивые, регулярные автоколебания (чередование) ортогональных направлений поляризации лазерного излучения с частотой собственных колебаний микроосциллятора (рис.4). Установлено существование автоколебаний в полностью волоконных лазерах, в которых участки специальных световодов играют роль оптоволоконных МОМРС, осуществляющих пассивную модуляцию добротности резонатора и, одновременно, совмещающих функции сенсорного элемента ВОД.

В условиях взаимодействия лазерного излучения одновременно с двумя микроосцилляторами (ВЛ-ММРС_{1,2}) с близкими



характеристиками экспериментально установлено, что в условиях резонанса $f_{rel.} \approx f_{1,2}$ возможны двухчастотные режимы автоколебаний с частотами $F_{1,2} \approx f_{1,2}$, при этом Фурье-спектр выходной интенсивности ВЛ содержит также спектральную компоненту с частотой ΔF , близкой к разности частот ММРС_{1,2}, $\Delta F \approx \Delta f = f_1 - f_2$ (рис.2.2). При $f_{1,2} \approx 50$ кГц бигармонический режим

наблюдается при расстройках (Δf) частот ($3 \div 8\%$). Разработана численная модель лазерных систем ВЛ-ММРС_{1,2}, подтвердившая характерные особенности двухчастотного режима.

Предсказан и экспериментально подтвержден эффект влияния условий отражения спонтанного излучения на внешней границе оболочки АС на характеристики автоколебаний в ВЛ-ММРС, что объясняется эффектом дополнительного снятия инверсии в АС из-за вынужденных переходов активных центров под действием обратноотраженного спонтанного излучения в АС.

Это открывает принципиально новые возможности в области разработки резонансных ВОД.

Предложен новый подход к реализации резонансных автоколебаний в ВЛ-ММРС, основанный на зависимости спонтанного времени жизни (τ_{sp}) в активном микросветоводе (АМС) от условий отражения на границе, которые варьируются в результате лазерного возбуждения изгибных колебаний АМС. Показано, что при $f_{rel.} \approx f$ в рассматриваемых ВЛ в условиях пассивной модуляции (τ_{sp}) также возможны синхронные автоколебания с частотой собственных изгибных колебаний АМС, причем, с повышенной стабильностью частоты автоколебаний.

Предложен метод повышения чувствительности лазерной системы к вынужденным колебаниям МОМРС, основанный на

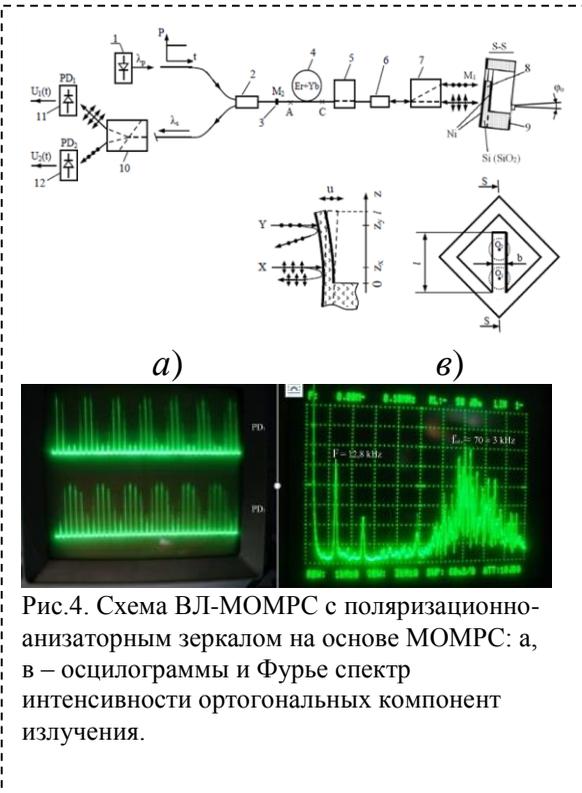


Рис.4. Схема ВЛ-МОМРС с поляризационно-анизаторным зеркалом на основе МОМРС: а, в – осциллограммы и Фурье спектр интенсивности ортогональных компонент излучения.

модуляции мощности накачки ВЛ с частотой (f_H) параметрического резонанса: $f_H \approx 2f \approx 2f_{rel}$. При регистрации малых акустических колебаний МОМРС в диапазоне частот $10 \div 100$ кГц, с помощью (Er/Yb и Nd)ВЛ-МОМРС в эксперименте получено увеличение чувствительности в 1,2 и 1,8 раза соответственно.

Основные результаты второй главы опубликованы в работах соискателя [30, 36, 38, 39, 45, 47, 52, 53, 57, 60, 62, 64,

70, 73, 74, 77, 83]

В третьей главе исследована динамика лазерных систем ВЛ-МОМРС в условиях резонанса $f \approx \Delta\nu$ -межмодовый интервал резонатора ВЛ, соответствующих режимам пассивной синхронизации (ПСМ) продольных и поляризационных мод ВЛ. В предложенных моделях лазерных систем МОМРС представлены пассивными внутрирезонаторными амплитудно-фазовыми модуляторами, приведены формулы для расчета их эквивалентных характеристик. Математические модели ВЛ-МОМРС, основанные на полевых уравнениях ВЛ, разработаны с использованием как пространственно -

временного, так и спектрально-модового подходов (осцилляторная модель).

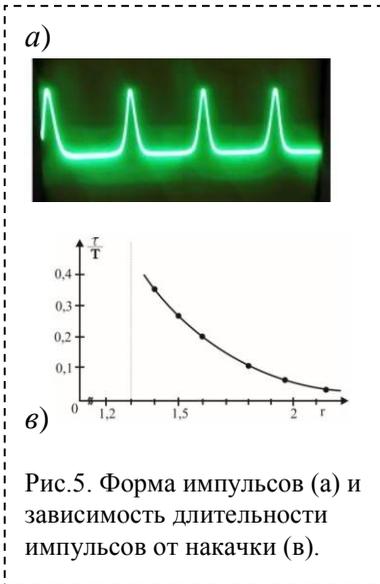


Рис.5. Форма импульсов (а) и зависимость длительности импульсов от накачки (в).

Впервые установлено, что оптомеханическая нелинейность в ВЛ приводит к режиму ПСМ. В пределах области существования ПСМ частота регулярных лазерных импульсов, имеющих форму, показанную на рис 5, зависит как от частоты межмодового интервала резонатора, так и собственной частоты микроосциллятора; при этом относительная нестабильность периода (временной «джиттер») лазерных импульсов может составлять (при добротности микроосцилляторов $Q \geq 100$) $\left| \frac{\Delta T}{T} \right| \lesssim 4 \cdot 10^{-4}$.

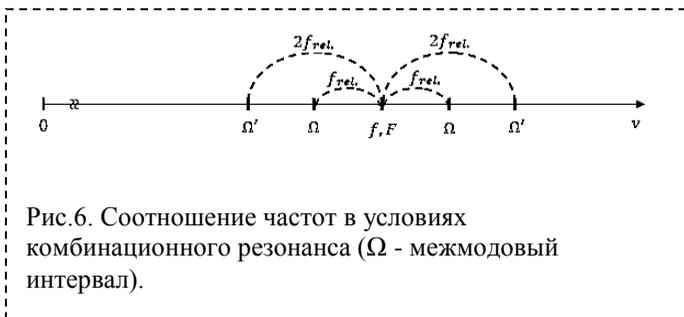
Экспериментальные результаты, полученные в ВЛ-МОМРС с автоколлиматорной и

интерферометрической связи в условиях возбуждения различных мод МОМРС приводят к выводу, что режим ПСМ возможен как в условиях пассивной модуляции одной лишь добротности резонатора, так и при одновременной модуляции: добротности, длины резонатора и доплеровского смещения частоты световой волны, отраженной от МОМРС. Установлено, что при значительных частотных расстройках, $\left| \frac{\Delta f}{f} \right| \gtrsim 10^{-2}$ происходит срыв режима синхронизации мод с переходом, в частности, в режим непрерывной генерации.

Показано, что благодаря «механической» многомодовости МОМРС, в лазерных системах с одним и тем же микроосциллятором можно реализовать резонансные условия $\Delta \nu \approx f_i$ для различных мод упругих колебаний МОМРС, $i = 1, 2, \dots$. Так, в ВЛ-МОМРС с одним и тем же микроосциллятором (микробалка, закрепленная на концах) в условиях возбуждения нечетных мод поперечных колебаний МОМРС с пучностью в центре, реализованы различные режимы ПСМ путем изменения единственного параметра в лазерной системе - длины

волоконного резонатора ВЛ! Это открывает возможности для создания импульсных источников лазерного излучения с дискретно регулируемой, стабильной частотой импульсов. Отмечена возможность перестройки частоты лазерных импульсов за счет спектрально-частотной связи, обусловленной хроматической дисперсией оптического резонатора ВЛ.

Обоснована возможность режимов ПСМ в условиях комбинационного резонанса с участием собственных колебаний МОМРС, межмодовых биений и релаксационных колебаний ВЛ. Анализ зависимости частот релаксационных колебаний и межмодового интервала в различных типах ВЛ от параметров резонатора показывает, что в условиях ограниченной мощности накачки и заданной выходной мощности ВЛ именно в Nd-ВЛ достигается наибольшее отношение $f_{rel.}/\Delta\nu$, обеспечивающее возможность реализации в ВЛ-МОМРС комбинационного резонанса вида: $kf + mf_{rel.} + n \cdot \Delta\nu = 0$, n, m, k - целые числа. В экспериментах с Nd-ВЛ со сверхдлинным резонатором (вплоть до 2,5км) с нелинейными зеркалами на основе кремниевых МОМРС показана возможность существования синхронных автоколебаний в условиях комбинационного резонанса: $f = \Delta\nu + m \cdot f_{rel.}$, где $m = 0, 1, 2$ (рис.6). При этом частота автоколебаний (F) определяется именно собственной частотой микроосциллятора $F \approx f$.



Выявленные особенности расширяют возможности реализации импульсных режимов генерации ВЛ, упрощают

задачу разработки автогенераторных ВОД. На базе ЭИВЛ-МОМРС, функционирующих в режиме ПСМ, показана возможность создания автогенераторных, высокочастотных ВОД температуры, давления.

Основные результаты третьей главы опубликованы в работах соискателя [40, 46, 55, 68]

В четвертой главе рассмотрены физические основы, методы создания и результаты исследований волноводных МОМРС на основе специальных световодов, включая микро-(нано)световоды (МНС), волоконные SMS-структуры.

Исследовано влияние интенсивного излучения в световоде на Эйлерову устойчивость световода. С помощью предложенной «гидродинамической» модели установлено существование критической мощности излучения $P_{кр}$, зависящей от упруго-механических и оптических параметров световода, превышение которой приводит к потере устойчивости световода. Исследовано лазерное возбуждение мод изгибных колебаний МНС в условиях параметрического резонанса: $f = k \cdot \frac{f_m}{2}$, где f_m - частота модуляции света, $k = 1, 2, \dots$, которое в силу универсальности давления света не накладывает жестких ограничений на характеристики материала световода, является безынерционным и не связано с поглощением излучения. Отмечено, что зависимость эффективной изгибной жесткости МНС от средней мощности излучения открывает возможности создания оптоволоконных МОМРС с оптически перестраиваемой резонансной частотой. Показано, что в консольных МНС с непрерывным излучением возможны автоколебания по высоким модам изгибных колебаний, приводящие к модуляции диаграммы направленности выходящего излучения.

Изложены основные свойства волоконных SMF-MMF-SMF (SMS) – структур с многомодовыми волоконными световодами (MMF) со ступенчатым профилем показателя преломления (в том числе – с MMF сегментом из кремния), которые, как известно, могут передавать «изображение»: при определенных длинах MMF-сегмента, $L_k = k \cdot L_0$, где $L_0 = \frac{16na^2}{\lambda}$ – «квазипериод», $k = 1, 2, \dots$, (a, n – радиус сердцевины и показатель преломления MMF, λ – длина волны излучения) (SMS) - структура имеет значительный коэффициент пропускания $T \approx 80 \div 90\%$.

Предложены и разработаны оптоволоконные МОМРС, основанные на амплитудно-фазовой модуляции излучения в SMS-структурах в условиях лазерного возбуждения мод собственных поперечных колебаний MMF сегмента. Высокая чувствительность SMS-структур к поперечным колебаниям MMF обеспечивается

условием «квадратуры», достигаемым за счет: 1) поперечного смещения осей SMF и MMF; 2) нанесения пленочных структур (MF) на определенные участки поверхности MMF, где направляемые лучи испытывают полное внутреннее отражение (рис.7), (метод не нарушает соосность волокон). Расчеты показывают, что в спектральном диапазоне 1000÷1600nm эффективны пленки никеля (Ni) или хрома (Cr), для которых $|\Delta\varphi| \approx (\pi/9 \div \pi/6) \text{ рад.}$, близкий к оптимальному значению $|\Delta\varphi|_{opt} = \pi/4$. Экспериментально показано, что при регистрации малых колебаний нанесение никеля приводит к повышению чувствительности МОМРС более чем на два порядка, при этом пленку достаточно нанести лишь на небольшой участок поверхности MMF (спектр пропускания показан на рис.7).

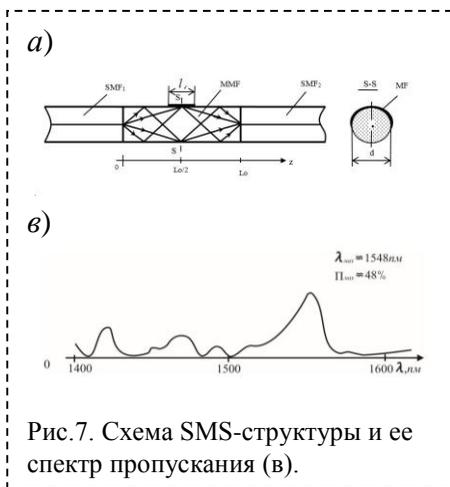


Рис.7. Схема SMS-структуры и ее спектр пропускания (в).

Изложен лабораторный метод создания SMS-структур на основе кварцевых световодов с широким диапазоном размеров MMF сегментов: $l \approx 3 \div 50 \text{ мм}$; $d \approx 15 \div 200 \text{ мкм}$, что позволяет в широких пределах варьировать параметры мод упругих колебаний, спектральные и модуляционные свойства МОМРС.

Приведены результаты исследований оптоволоконных МОМРС, основанных на чисто амплитудной модуляции за счет: туннелирования излучения из области перетяжки одномодового волокна в подложку; макро- и микроизгибных потерь в многомодовых сегментах в условиях избирательного возбуждения фундаментальной моды (LP_{01}), которые в силу относительно слабой спектральной зависимости потерь обеспечивают широкий рабочий спектральный диапазон МОМРС.

Представлены экспериментальные данные по возбуждению волноводных МОМРС под действием оптических «градиентных» сил в

зоне «туннелирования», которые не связаны с поглощением света и эффективны в широком диапазоне частот.

Показана возможность создания новых типов МОМРС, основанных на «краевом» резонансе (КР) в волоконных световодах. Интерес к данному явлению обусловлен тем, что «резонансная» частота КР определяется свойствами среды и конфигурацией тела лишь в той малой области тела, в которой сосредоточена локализованная мода и не зависит от свойств среды и граничных условий для тела. Это открывает перспективы создания высокостабильных МОМРС.

В волоконных световодах, рассматриваемых в качестве модели полубесконечного упругого стержня, КР имеет место в области торца световода, при этом анализ характера деформаций торца световода в условиях КР показывает, что именно многомодовая интерференция в SMF-MMF структурах отражательного типа является эффективным методом исследования «краевого» резонанса, приводящего к модуляции коэффициента отражения SMF-MMF структуры. С помощью отражательных SMF-MMF структур на основе кварцевых MMF в никелевом покрытии экспериментально продемонстрировано магнестрикционное возбуждение «краевого» резонанса в торцевой области с частотой низшей моды 10,7 МГц. Регистрация колебаний формы торца осуществлена с помощью волоконно-оптического интерферометра с пороговой чувствительностью $z_{min} \approx 0,4 \cdot 10^{-12} \text{ м} / \sqrt{\text{Hz}}$.

Предложен метод лазерного возбуждения низшей моды «краевого» резонанса в MMF, основанный на эффекте давления света, при этом необходимый профиль распределения интенсивности лазерного излучения в зоне локализации колебаний (на торце световода) реализуется за счет многомодовой интерференции в волоконных SMF-MMF структурах. Для кварцевых световодов с диаметром $D = 150\text{-}200$ мкм. при эффективной добротности $Q = 100$, оценки средней мощности излучения, необходимой для возбуждения осесимметричной моды КР с амплитудой $A = 10^{-12} \text{ м}$ (1рм.) составляют $P \approx 1$ Вт.

На основе MMF в металлическом покрытии (никель, медь, золото) созданы лазерно-возбуждаемые оптоволоконные МОМРС с регулируемыми (в пределах $\left| \frac{\Delta f}{f} \right| \lesssim 30\%$), резонансными частотами,

управляемыми с помощью статических магнитных и электрических полей, электрического тока, температуры, продольных механических напряжений и т.д., открывающих возможности для создания широкого класса резонансных ВОД.

Основные результаты четвертой главы опубликованы в работах соискателя [33,42, 43, 49, 54, 63, 72, 75]

В пятой главе обоснована актуальность разработки резонансных ВОД, основанных на возбуждении и считывании параметров резонансных колебаний МОМРС оптическими методами, изложены принципы построения и результаты исследований нового класса резонансных ВОД на основе лазерных систем ВЛ-МОМРС. В рассматриваемых ВОД волоконные лазеры могут выполнять несколько функций: источника света, гетеродинного преобразователя принимаемого излучения, усилителя оптических сигналов, сенсорного элемента, в которых измерения могут осуществляться в режимах: автоколебаний, свободных и вынужденных колебаний. В отличие от ВОД, разработанных в работах [14-16], использование оптоволоконных МОМРС позволяет реализовать резонансные ВОД в полностью волоконном, диэлектрическом исполнении, что существенно расширяет области их применений, условия функционирования. Отмечен круг задач, решение которых без использования резонансных ВОД существенно затруднено или невозможно (измерение «присоединенной» массы; контроль ад(де)-сорбционных процессов; определение упруго-механических характеристик материалов в динамических режимах; исследование структурных фазовых переходов, химических реакций, связанных изменением термомеханических свойств и напряженно-деформированного состояния, материала). МОМРС открывают уникальные возможности при исследовании (в том числе – бесконтактных) свойств микро-(нано)размерных объектов, включая биологические структуры на клеточном уровне и т.д.

Приведены результаты разработки автогенераторных ВОД механических и термодинамических величин с сенсорными элементами на основе оптоволоконных и микрооптических кремниевых МОМРС, которые по основным метрологическим показателям могут превосходить электромеханические аналоги – широко применяемые струнные преобразователи.

На основе результатов исследований переходных процессов в автоколебательных системах ВЛ-МОМПС сделан вывод о возможности создания частотных ВОД динамических величин. В частности, на основе миниатюрных (Yb)-ВЛ-МОМПС разработан макет ВОД акустических давлений с первичным преобразователем, целиком включающим лазерную систему.

Предложены и разработаны схемы ВОД, использующие режимы свободных и вынужденных колебаний МОМПС, в которых лазерное возбуждение колебаний осуществляется «остаточным» модулированным излучением накачки ВЛ, при этом регистрация колебаний осуществляется с помощью зондирующего суперлюминесцентного (ASE) излучения, которое после взаимодействия с МОМПС повторно проходит через активную среду и существенно усиливается. Предлагаемый подход тем эффективнее, чем больше время жизни метастабильного уровня АС, $\tau_{sp} \gg f^{-1}$, что обеспечивает квазинепрерывность ASE.

Определены основные дестабилизирующие факторы, определяющие точность измерений автогенераторных ВОД на основе ВЛ-МОМПС: нестабильности параметров лазерного резонатора ВЛ (мощности накачки, добротности, длины резонатора и т.д.) и характеристик МОМПС (собственной частоты, добротности, неизохронности микроосциллятора). влияние естественных флуктуаций (спонтанного излучения в ВЛ). В лабораторных условиях в ВЛ-МОМПС с нерезонансной обратной связью достигнута стабильность частоты автоколебаний $\frac{\Delta F}{F} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ ($Q \approx 170$, $\tau = 10$ сек.)

С помощью балансных схем, реализованных на основе (Er-Yb) суперлюминесцентных ВЛ, показана возможность регистрации термофлуктуационных колебаний МОМПС, на этом принципе разработаны резонансные ВОД (температуры, деформаций), не требующие специального источника возбуждения колебаний, основанные на анализе параметров флуктуационных колебаний оптоволоконных микроосцилляторов. Оценки предельной точности измерения резонансной частоты, позволяют сделать вывод о практической значимости и перспективности разработки резонансных ВОД с термофлуктуационным возбуждением.

Предложены методы создания многопараметрических,

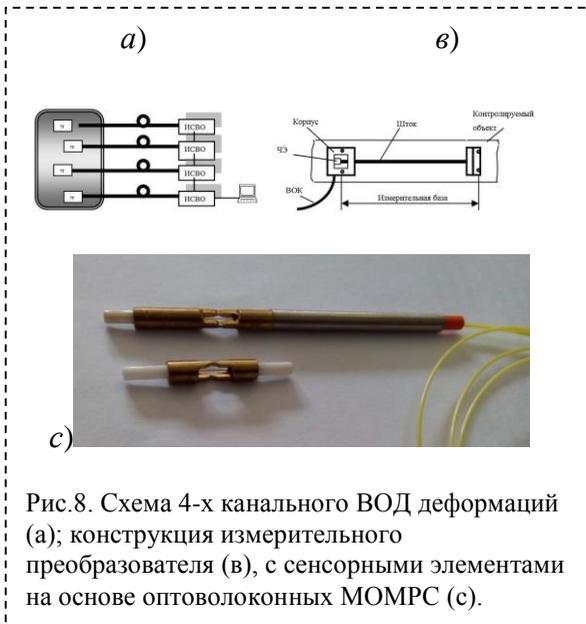


Рис.8. Схема 4-х канального ВОД деформаций (а); конструкция измерительного преобразователя (в), с сенсорными элементами на основе оптоволоконных МОМРС (с).

многоканальных резонансных ВОД, основанных на частотном разделении измерительных каналов, которые можно реализовать либо за счет использования нескольких МОМРС с различными резонансными частотами, либо же возбуждением различных мод одного и того же МОМРС. В предложенных

схемах ВОД накачка отдельных лазерных систем (ВЛ-МОМРС); осуществляется излучением единого (общего) лазера накачки, при этом возможно как последовательное, так и одновременное возбуждение колебаний в отдельных измерительных каналах (рис.8)

Основные результаты пятой главы опубликованы в работах соискателя [31, 32, 35, 37, 41, 44, 48, 50, 51, 54, 56, 58, 59, 61, 65, 66, 67, 69, 71, 72, 76, 78, 79, 80-82, 84]

В заключении диссертации приведены основные выводы и результаты, полученные в работе:

1. Выполнен анализ режимов периодических колебаний микроосцилляторов, взаимодействующих в лазерным излучением в условиях внутренних резонансов; экспериментально показано, что в волоконных лазерах в условиях резонанса релаксационных колебаний в ВЛ и собственных колебаний микроосциллятора синхронные

автоколебания существуют независимо от: конфигурации резонатора; схем рабочих уровней и способов накачки активного световода; модового состава лазерного излучения; типов микроосцилляторов и механизмов оптического возбуждения колебаний; автоколебания имеют место в волоконных лазерах также с нерезонансной обратной связью, реализованной с помощью отражателей в виде диффузно рассеивающих поверхностей или сред; частота автоколебаний определяется, в основном, собственной частотой микроосциллятора.

2. Предложены методы управления состоянием поляризации излучения в волоконных лазерах, основанные на конкурентном взаимодействии поляризационных мод анизотропного резонатора с поляризационно-анизотропным микроосциллятором в условиях внутренних резонансов, которые приводят к существованию регулярных автоколебаний направления поляризации излучения в волоконных лазерах с частотой, определяемой, в основном, собственной частотой микроосциллятора.

3. Установлено, что в волоконных лазерах с составными зеркалами на основе двух микроосцилляторов с собственными частотами, близкими к частоте релаксационных колебаний в лазере, при достаточных расстройках собственных частот существует двухчастотный (бигармонический) режим синхронных автоколебаний. При этом Фурье-спектр лазерного излучения содержит наряду с собственными частотами микроосцилляторов также компоненту с их разностной частотой. При малых расстройках собственных частот имеет место одночастотный режим автоколебаний.

4. В волоконных лазерах с внутрирезонаторной оптомеханической нелинейностью впервые осуществлен режим пассивной синхронизации мод. В области синхронизации частота лазерных импульсов зависит от межмодового интервала и собственной частоты микроосциллятора. Показана возможность переключения режимов пассивной синхронизации мод путем дискретного изменения длины лазерного резонатора.

5. Установлено, что в ВЛ в условиях комбинационного внутреннего резонанса, когда разность частот межмодовых биений и собственных колебаний микроосциллятора, кратна частоте

релаксационных колебаний, в лазерной системе возбуждаются автоколебания на собственной частоте микроосциллятора. Автоколебания имеют место при длинах лазерного резонатора, по крайней мере, до 2,5 км.

6. Выявлена сложная структура зон возбуждения автоколебаний, установлено, что с ростом накачки происходит «хаотизация» автоколебаний через последовательности удвоения периода. Зависимости параметров автоколебаний в пределах зоны «мягкого» возбуждения имеют непрерывный, однозначный характер, в «жестком» - возможны скачки и гистерезисное поведение параметров. Обнаружено влияние отражения (рассеяния) излучения на границе кварцевой оболочки активного световода с внешней средой на частоту автоколебаний, что объясняется дополнительным снятием инверсии населенностей в активной среде под действием рассеянного спонтанного излучения. В нормальных условиях в эрбий-иттербиевых волоконных лазерах с микроосцилляторами реализованы режимы автоколебаний с кратковременной относительной флуктуацией частоты, не превышающей $2 \cdot 10^{-6}$.

7. Предложены математические модели взаимодействия лазерного излучения с МОМРС, выполнены численные исследования автоколебаний в ВЛ-МОМРС в приближении «точечной» и распределенной систем, позволившие выявить влияние пространственной неоднородности в активном световоде на условия возбуждения автоколебаний в лазерных системах. Про моделированы переходные процессы, возникающие при возбуждении и срыве автоколебаний, определены зависимости параметров автоколебаний от основных характеристик лазерной подсистемы и микроосцилляторов.

8. В рамках приближения скоростных уравнений впервые рассмотрены особенности динамики волоконных лазеров, обусловленные зависимостью времени жизни метастабильного уровня в активном световоде от граничных условий. Показано, что пассивная модуляция времени жизни метастабильного уровня приводит к изменению порога возбуждения и параметров автоколебаний, частота которых определяется, в основном, собственной частотой моды упругих колебаний активного микросветовода.

9. Изучено влияние излучения в микросветоводе на статическую и динамическую неустойчивость микросветовода, получены приближенные формулы, описывающие зависимости критической силы Эйлера неустойчивости и собственных частот мод поперечных колебаний микросветоводов от оптической мощности. Определены условия параметрического возбуждения собственных поперечных колебаний микросветоводов; установлено существование автоколебаний по второй моде изгибных колебаний в консольных микросветоводах с непрерывным излучением.

10. Предложены методы возбуждения и регистрации вынужденных, свободных колебаний микроосцилляторов в лазерных системах ВЛ-МОМРС, основанные на инерционности активной среды и суперфлуоресцентного излучения, возникающего в АС в условиях модуляции накачки. Показано, что в лазерном режиме модуляция накачки в условиях параметрического резонанса повышает чувствительность лазерной системы к вынужденным колебаниям МОМРС, что открывает возможности для создания нового класса резонансных ВОД, основанных на термофлуктуационных резонансных колебаниях, что обеспечивает минимальную составляющую погрешности, связанную с неизохронностью колебаний МОМРС.

11. Разработаны физические основы и способы реализации оптоволоконных МОМРС, использующих модуляцию лазерного излучения за счет оптического туннелирования, межмодовой связи и многомодовой интерференции в сегментах специальных световодов в условиях лазерного возбуждения изгибных колебаний и волн, открывающих возможности создания резонансных ВОД в полностью волоконном исполнении. Предложены принципы построения многоканальных, многопараметрических ВОД, которые успешно прошли апробацию в промышленности в качестве составных частей систем мониторинга строительных сооружений.

Список литературы:

1. Heidmann A. Nano- and micro-optomechanical systems // C.R. Physique, 2011, 12, №9-10, 797-780.

2. Aspelmeyer M., Kippenberg T.J., Marquardt F. Cavity Optomechanics, Nano- and Micromechanical Resonators Interacting with Light // Springer – Verlag Berlin Heidelberg – 2014, 353 p.

3. Кузин А.Ю. Обеспечение точности измерений в сетях волоконно – оптических датчиков в условиях дестабилизирующих воздействий// дис. ... докт. техн. наук. – Москва, 1996 г.

4. Гуляев Ю.В., Бугаев А.С., Быстров Р.П., Никитов С.А., Черепенин В.А. Микро- и наноэлектроника в системах радиолокации. – М.: Радиотехника, 2013. – 480с.

5. Hasseini-Zaden Mani and Kerry J. Vahala. An Optomechanical Oscillator on a Silicon Chip // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, v.16, №1, p.276-287.

6. Цуканов А.В. Оптоэлектромеханические системы и квантовая информатика // Микроэлектроника, 2011, т.40. №5, с.359–369.

7. Churenkov A.V. Photothermal excitation and self – excitation of silicon microresonators // Sensors and Actuators, 1993, A39, p.141 – 148.

8. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. – М.: Физматлит – 2011. – 416 с.

9. Carmon T. and Tomes M. Micro-optomechanical device vibrates at record rates. SPIE Newsroom. 2010. DOI: 10.1117/2.1200912.002537

10. Chen Y. Macroscopic Quantum Mechanics: Theory and Experimental Concepts of Optomechanics // J.Phys. 2013, B 46, 104001

11. Городецкий М.Л., Данилишин Ш.Л., Халили Ф.Я., Чен Я. Оптическое охлаждение макро-, микро- и наномеханических осцилляторов // Нанотехнологии: разработка, применение, 2009, №1, т.1, с.56-67.

12. Unal M., Alapan Y. Jia H. et al. Micro and Nano-scale Technologies for Cell Mechanics // Nanobiomedicine, 2014, 1:5 /doi:10.5772/ 59379, p.1-29.

13. Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Эффект автомодуляции в системе лазер-микрорезонатор // Письма в ЖТФ – 1996 – т.20, вып.19, – с.19-23.

14. Егоров Ф.А. Автомодуляция интенсивности лазерного излучения, взаимодействующего с микрорезонаторными структурами// дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва – 1997г.

15. Бурков В.Д. Микрорезонаторные волоконно-оптические датчики и системы измерения физических величин на их основе// дис. ... докт. техн. наук, Москва – 1999г.
16. Дехтяр А.В. Мультиплексная система для измерения температуры на основе микрорезонаторных волоконно-оптических датчиков// дис. ... канд. техн. наук, Москва – 1999г.
17. Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. М.:Наука,1999.–368с.
18. Самсон А.М., Котомцева Л.А., Лойко Н.А. Автоколебания в лазерах. – Минск: Наука и техника, 1990. – 278 с.
19. Хандохин П.А. Низкочастотная динамика лазеров с инерционной активной средой // дис. ...докт. физ.-мат. наук, Нижний Новгород – 2007г.
20. Кащенко С.А., Григорьева Е.В. Релаксационные колебания в лазерах. – М.: Книжный дом "Либроком", 2013. – 266 с.
21. Кузьминский Л.С. Автоколебательная неустойчивость в газовых лазерах с поперечным протоком двухкомпонентной активной среды // дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Москва - 2009.
22. Дудецкий В.Ю., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. Синхронизация автоколебаний в твердотельном кольцевом лазере при модуляции накачки в области параметрического резонанса между автомодуляционными и релаксационными колебаниями // Квантовая электроника, 2014, т.44, №1, с. 23-29;
23. Золотоверх И.И., Камышева А.А., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Фирсов В.В., Чекина С.Н. Нелинейные процессы при удвоении периода автомодуляционных колебаний в кольцевом твердотельном лазере // Квантовая электроника – 2008 - т.38, №10 С. 956-960.
24. Dodonov V.V. and Klimov A.B. Generation and detection of photons in a cavity with a resonantly oscillating boundary // Phys. Rev. 1996, A.53, 2664-2682.
25. Воторопин С.Д., Закарлюк Н.М., Носков В.Я., Смольский С.М. О принципиальной невозможности самосинхронизации автодина излучением, отраженным от движущегося объекта // Изв. вузов. Физика – 2007, №9, с.53-59.
26. Курков А.С. Волоконные источники излучения в диапазоне 1-2 мкм// дис. ... докт. физ.-мат. наук, Москва – 2003г.

27. Ter – Mikirtychev Valerii (Vartan). Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers, Springer, 2014, - 235 p.

28. Edited by Okhotnikov Oleg G. Fiber Lasers. Wiley – VCH, 2012, - 278 p.

29. НТО «ИРЭ-ПОЛЮС», <http://www.ntoire-polus.ru/>

Публикации соискателя по теме диссертации:

Статьи в журналах из рекомендованного перечня ВАК РФ

30. Егоров Ф.А., Темиров Ю.Ш., Дворянкин В.Ф., Потапов В.Т., Соколовский А.А. Тонкие пленки VO_2 с высоким оптическим контрастом // Письма в ЖТФ. – 1991. – №8. – С.49–52.

31. Егоров Ф.А., Темиров Ю.Ш., Соколовский А.А., Дворянкин В.Ф. Оптически управляемый волоконный переключатель на основе пленок VO_2 // Письма в ЖТФ. – 1991. – №9. – С.81–86.

32. Егоров Ф.А., Темиров Ю.Ш., Соколовский А.А., Дворянкин В.Ф., Кухта А.В., Старостин Н.И. Волоконный, оптически управляемый модулятор излучения на основе двуокиси ванадия // Письма в ЖТФ. – 1991. – №22. – С.85–90.

33. Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Волоконно-оптический термометр и его применение в измерителе мощности СВЧ-поля с ферритовым преобразователем мощность-температура // Радиотехника и электроника. – 1993. – Вып.11. – С.2097–2103.

34. Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Малков Я.В., Потапов В.Т. Микрорезонаторные волоконно-оптические преобразователи автогенераторного типа // Радиотехника. – 1998. – №3. – С.36–40.

35. Бурков В.Д. Егоров Ф.А., Малков Я.В., Потапов В.Т. Оптическое мультиплексирование микрорезонаторных датчиков физических величин на основе волоконного лазера // ЖТФ. – 2000. – Т.70. – Вып.1. – С.113–116.

36. Бурков В.Д. Егоров Ф.А., Потапов В.Т., Потапов Т.В. Численное моделирование явления резонансной автомодуляции в системе эрбиевый волоконный лазер – микрорезонатор // Радиотехника и Электроника. – 2000. – Т.45. – №7. – С.880–886.

37. Вельшер Л.З., Стаханов М.Л., Егоров Ф.А. Королев В.А., Потапов В.Т., Долганов Е.Е. Катетер с волоконно-оптическим датчиком температуры для оперативной эндоскопии // Лазерная медицина. – 2001. – Т.5 – №4. – С.32–34.

38. Егоров Ф.А., Крикунов А.И. Оптический контроль в технологии изготовления магниторезистивных спин-туннельных элементов // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т.49. – №8. – С.995–998.

39. Егоров Ф.А., Потапов В.Т., Бурков В.Д. Особенности автомодуляции излучения волоконных лазеров с микрорезонаторными зеркалами // ЖТФ. – 2005. – Т.75. – Вып.1. – С.70–73.

40. Егоров Ф.А., Никитов С.А., Потапов В.Т. Волоконно-оптические датчики на основе возбуждаемых светом микрорезонаторных структур // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т.50. – №6. – С.736–741.

41. Егоров Ф.А., Королев В.А., Потапов В.Т., Стаханов М.Л. Волоконно-оптический термометр для контроля гипертермической терапии // Лазерная медицина. – 2005. – Т.9 – №3. – С.53–54.

42. Егоров Ф.А., Неугодников А.П., Поспелов В.И., Потапов В.Т. Волоконно - оптический датчик температуры с полупроводниковым чувствительным элементом// Датчики и Системы.–2006.– №6.– С.20-22.

43. Гаврюшин С.С., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н., Неугодников А.П., Свиринов В.Н., Поспелов В.И., Потапов В.Т. Расчет термоиндуцированных напряжений в чувствительных элементах волоконно-оптических датчиков // Радиотехника. – 2006. – №5,6. – С.53–55.

44. Егоров Ф.А., Неугодников А.П., Поспелов В.И. Контроль и диагностика параметров строительных сооружений с помощью волоконно-оптических систем мониторинга // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – №6, С.55-61.

45. Егоров Ф.А., Неугодников А.П., Никитин В.В., Потапов В.Т. Математическое моделирование автомодуляционных режимов в волоконном лазере с микрорезонаторным отражателем // Вестник МГУ. Серия 3, Физика. Астрономия. – 2009. – №6. – С.45–49.

46. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Пассивная синхронизация мод волоконно-оптического лазера с помощью микрорезонаторного отражателя // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т.35. – Вып.12. – С.104–110.

47. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Волоконный лазер с пассивным модулятором добротности на основе фотоиндуцированных

резонансных колебаний световода // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36 – №2. – С.86–89.

48. Egorov F. and Potapov V. Fiber-Optic Sensors Based on Fiber-Optic Lasers and Microoptomechanical Resonance Structures // Laser Physics. – 2011. – Vol.21 – №2 – pp.1–5.

49. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Параметрические колебания микро-наносветоводов // Письма в ЖТФ, 2011. – Т.37. – №7. – С. 47–53.

50. Егоров Ф.А., Неугодников А.П., Быковский В.А., Ларин О.А. Исследования напряженно-деформированного состояния грунта с помощью волоконно-оптических датчиков деформаций и давления // Монтажные и специальные работы в строительстве.–2011.–№7.–С.5-8.

51. Егоров Ф.А., Неугодников А.П., Велиюлин И.И., Зорин А.Е., Васильев П.И. Исследование напряженно-деформированного состояния труб магистрального трубопровода с помощью волоконно-оптических датчиков деформации // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2011. – №10. – С.26–29.

52. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Оптоволоконные виброчастотные преобразователи на основе нерегулярных световодов // Письма в ЖТФ – 2012. – Т.38. – №11. – С.61-68.

53. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Автомодуляционные режимы генерации волоконных лазеров с микрооптомеханическими резонансными структурами // Квантовая электроника – 2012. – Т.42. – №9. – С.808–817.

54. Егоров Ф.А. Волоконно - оптические датчики, основанные на флуктуационных колебаниях световодных микрооптомеханических резонансных структур // ЖТФ. – 2013. – Т.83. – Вып.11. – С.100–104.

55. Егоров Ф.А., Потапов В.Т., Мелькумов М.А., Шубин А.В. Автоколебания в неодимовых волоконных лазерах с микрооптомеханическими структурами // Письма в ЖТФ – 2014. – Т.40. – №8. – С.30–36.

56. Егоров Ф.А., Неугодников А.П., Быковский В.А., Шерстюк С.П. Автоматизированная система мониторинга инженерных конструкций. Практика применения // Датчики и Системы. – 2014. – №11. – С.71-78

57. Егоров Ф.А. Автоколебания направления поляризации излучения в волоконных лазерах с микрооптомеханическими

резонансными структурами// Письма в ЖТФ. –2015.–Т.41.№8.– С.61-68.

58. Егоров Ф.А. Амеличев В.В. Генералов С.С., Никифоров С.В., Шаманаев С.В., Гольдберг Я.В. Волоконно-оптический гидрофон с возможностью дистанционной самокалибровки// Микроэлектроника. – 2016, т.45, №5, С. 396-400

59. Егоров Ф.А., Потапов В.Т., Мелькумов М.А. Амеличев В.В. Генералов С.С. Шаманаев С.В. Волоконно – оптический частотный датчик переменного давления в газообразных и жидких средах// Письма в ЖТФ – 2016, – Т.42, вып. 10, С. 9 - 16.

Труды конференций, семинаров

60. Бурков В.Д. Егоров Ф.А., Потапов В.Т., Потапов Т.В., Смирнов Р.М. Численное моделирование автоколебаний в системах эрбиевый волоконный лазер – микрорезонатор // Труды Российского научного-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. LV научная сессия, посвященная дню радио, Москва, 17-19 мая 2000 г. – С.168–169.

61. Бурков В.Д. Егоров Ф.А., Потапов В.Т., Потапов Т.В. Микрорезонаторный волоконно-оптический датчик магнитного поля // Сб. трудов 13-ой Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2000», г. Санкт-Петербург, 27-29 июня 2000г., Том 7, С.84–85.

62. Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Волоконно-оптическая измерительная система на основе параллельно включенных микрорезонаторных датчиков физических величин // Труды XXVIII Международной конференции «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе», IT+SE'2001, Украина, Крым, Ялта-Гурзуф, 20-29 мая 2001г.– С.277–279.

63. Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Егоров С.А., Потапов В.Т. Волоконно-оптические датчики температуры// Труды XXIX Международной конференции «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе», IT+SE'2002, Ялта-Гурзуф, 20-30 мая 2002 г. – С.177–180.

64. Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Макеев А.А., и др. Моделирование многоканальных волоконно-оптических микрорезонаторных измерительных систем// Сб. трудов 17-ой Международной научн.

конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-17, г. Кострома, 1-3 июня 2004 г. – Т.8. – С.5–10.

65. Гармаш В.Б., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н. и др. Волоконно-оптические датчики и информационно-измерительные системы // Сб. докл. Международной научно-технической конференции «Датчики и системы 2005», г. Пенза, 6-10 июня 2005 г. – С.39–49.

66. Егоров Ф.А., Гамкрелидзе С.А., Потапов В.Т., Коломиец Л.Н. Автогенераторные волоконно-оптические датчики на основе микрорезонаторов // Сб. докл. Международной научно-технической конференции «Датчики и системы 2005», г. Пенза, 6-10 июня 2005 г. – С.305–308.

67. Егоров Ф.А., Неугодников А.П., Быковский В.А. Экспериментальные исследования волоконно-оптических датчиков для контроля деформаций железобетонных конструкций // Сб. научных трудов II-го Международного симпозиума «Проблемы современного бетона и железобетона», г. Минск, 21-23 октября, 2009г., ч.1, С.221–232.

68. Егоров Ф.А., Никитов С.А., Потапов В.Т. Волоконно-оптические датчики физических величин на основе микрооптомеханических резонансных структур // Тез. докл. 2-ой Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2009, г. Пермь, 8-9 октября 2009г. Фотон-Экспресс. – 2009. – №6(78). – С.95.

69. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Волоконно-оптические датчики физических величин на основе волоконных лазеров и микрооптомеханических резонансных структур // «Материалы IV Российского семинара по волоконным лазерам», г. Ульяновск, 19-22 апреля 2010г., – С. 140–142.

70. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Методы мультиплексирования волоконно-оптических датчиков на микрооптомеханических резонансных структурах // Тез. докл. 3-й Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2011, г. Пермь, 12-14 октября 2011г. Фотон-Экспресс. – 2011. – №6. – С.24–25.

71. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Датчики деформаций на основе волоконных лазеров // 5-й Российский семинар по волоконным лазерам, г. Новосибирск, 27-30 марта 2012г. Материалы семинара. – С.70–71.

72. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Волоконно-оптические датчики, основанные на флуктуационных колебаниях световодных

микрооптомеханических резонансных структур // Тез. докл. 4-ой Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2013, г. Пермь, 16-18 октября 2013г. Фотон-Экспресс. – 2013.– № 6.– С. 51–52.

73. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Оценки влияния спонтанного излучения на характеристики автоколебаний в волоконных лазерах с микрооптомеханическими структурами // 6-й Российский семинар по волоконным лазерам, г. Новосибирск, Академгородок, 14-18 апреля 2014г. – Материалы семинара. – С.160–161.

74. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Автоколебания направления поляризации излучения волоконных лазеров с микрооптомеханическими резонансными структурами // Тез. докл. 5-ой Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО – 2015, г. Пермь, 7–9 октября 2015г. Фотон - Экспресс.–2015. –№ 6.–С.59 – 60.

75. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Модуляция оптического излучения с помощью микро – (нано) оптомеханических резонансных структур, возбуждаемых светом. Доклады Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (REDS – 2016), Москва, 25 – 27 мая 2016 г., С.467 – 472.

76. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Оценки нестабильности параметров автоколебаний в волоконных лазерах с микрооптомеханическими резонансными структурами // 7-й Российский семинар по волоконным лазерам, г. Новосибирск, Академгородок, 6-9 октября 2016г.– Материалы семинара.– С. 142-143.

77. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Динамика волоконных лазеров на основе активных микро-(нано)световодов с модулируемым спонтанным временем жизни. Сб. научн. трудов VI Международной конференции «Фотоника и информационная оптика». Москва, НИЯУ МИФИ, 1-3 февраля 2017г. С.189-190.

Патенты РФ на изобретения

78. Бурков В.Д., Гориш А.В., Егоров Ф.А., Коптев Ю.Н. и др. Волоконно-оптический датчик температуры на основе микрорезонатора // Патент РФ на изобретение №2161783, Бюл.№1, 10.01.2001г.

79. Бурков В.Д., Гориш А.В., Егоров Ф.А., Коптев Ю.Н. и др. Волоконно-оптический автогенератор // Патент РФ на изобретение №2163354, Бюл.№5, 20.02.2001г.

80. Бурков В.Д., Гориш А.В., Егоров Ф.А., Коптев Ю.Н. и др. Микрорезонаторный волоконно - оптический датчик электрического тока // Патент РФ на изобретение №2170439, Бюл.№19, 10.07.2001г.

81. Бурков В.Д., Гориш А.В., Егоров Ф.А., Коптев Ю.Н. и др. Микрорезонаторный волоконно-оптический датчик магнитных полей // Патент РФ на изобретение №2202115, Бюл.№10, 10.04.2003г.

82. Бурков В.Д., Гориш А.В., Егоров Ф.А., Коптев Ю.Н., Кузнецова В.И., Потапов В.Т. Мультиплексная система автогенераторных микрорезонаторных волоконно-оптических датчиков физических величин// Патент РФ на изобретение №2204810, Бюл.№14, 20.05.2003г.

83. Бурков В.Д., Гориш А.В., Егоров Ф.А., Коптев Ю.Н., Кузнецова В.И., Потапов В.Т. Волоконно-оптический автогенератор // Патент РФ на изобретение №2226674, Бюл.№10, 10.04.2004г.

84. Егоров Ф.А., Неугольников А.П. Волоконно-оптический датчик перемещений с возможностью дистанционной градуировки и способ измерения посредством такого датчика // Патент РФ на изобретение №2502955, Бюл.№36, 27.12.2013г.