На правах рукописи



МАРИСОВА Мария Павловна

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ И ДИСПЕРСИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СФЕРИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СТЕКОЛ

1.3.19. – Лазерная физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: **Анашкина Елена Александровна**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор РАН, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: **Романова Елена Анатольевна**, доктор физико-математических наук, профессор, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (г. Саратов)

Лобанов Валерий Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий, (г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (г. Новосибирск)

Защита диссертации состоится 14 декабря 2026 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ipfran.ru ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Автореферат разослан 9 ноября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования

Оптические диэлектрические микрорезонаторы находят широкое применение как в фундаментальной науке, так и в практических приложениях [1]. Например, они могут быть использованы для создания высокоточных сенсоров и датчиков, в том числе биологических агентов, а также оптической и радиофильтрации [2]. Нелинейные микрорезонаторы позволяют генерировать оптические частотные гребёнки, что расширяет их применимость на такие приложения как спектроскопия, телекоммуникации, оптическая когерентная томография, оптические атомные часы и другие [1].

В микрорезонаторах с модами шепчущей галереи (МШГ) лазерное излучение циркулирует по периметру вблизи внутренней границы за счёт полного внутреннего отражения [3]. Их отличительной чертой является огромная добротность, достигающая $\sim 10^5 \ldots 10^9$ и более в зависимости от материала, геометрии и способа изготовления [3]. Помимо этого, эффективные объёмы МШГ весьма малы, так как их электрические поля сильно локализованы вблизи поверхности резонатора. Благодаря этим свойствам интенсивности внутрирезонаторных полей мод даже при небольших мощностях непрерывной лазерной накачки (от ~0.1…10 мВт) могут достигать значений, при которых эффективно реализуются нелинейно-оптические процессы, приводящие к преобразованию частот.

Микрорезонаторы могут иметь различные формы: дисковые, сферические, тороидальные, веретенообразные, кольцевые на чипе; материалы для их изготовления также отличаются разнообразием [3; 4]. При этом нелинейная динамика внутрирезонаторного излучения в разных типах микрорезонаторов зачастую может быть описана в рамках одних и тех же математических моделей, что позволяет получать достаточно универсальные, масштабируемые результаты при исследовании какого-либо определенного типа. Диссертационная работа выполнена в научной группе, где развита технология изготовления сферических микрорезонаторов из различных стёкол, поэтому проведенные теоретические исследования во многом ориентированы на экспериментальные возможности группы. Значительное внимание уделено сплошным сферическим микрорезонаторам из наиболее распространенного кварцевого (SiO_2) стекла по следующим причинам. Сплошные кварцевые микросферы размером от нескольких десятков до сотен микрон можно быстро и воспроизводимо изготовить из отрезка обычного телекоммуникационного волокна, например, с помощью аппарата для сварки волокон. При этом, изменяя диаметр резонатора контролируемым образом, можно достичь как аномальной, так и нормальной дисперсии групповых скоростей (ДГС) в телекоммуникационном диапазоне, где хорошо развита компонентная база. Поэтому кварцевые микросферы являются удобной платформой для изучения различных процессов на основе кубичных (керровской и рамановской) нелинейностей.

Более того, с точки зрения практического использования микросферы с подводящими/отводящими свет волноводами могут быть надежно упакованы, обеспечивая стабильное функционирование фотонного устройства на их основе (хотя с точки зрения массового внедрения их возможности оцениваются ниже, чем для микрорезонаторов на чипе).

Микрорезонаторы также могут изготавливаться из других стёкол, среди которых особенный интерес представляют стёкла с более высокими значениями коэффициента керровской и рамановской нелинейностей и более широкой полосой прозрачности [5]. В качестве таких материалов рассматриваются германосиликатные, германатные, теллуритные и халькогенидные стёкла. Нелинейный показатель преломления (n_2) германатного стекла (GeO_2) примерно вдвое превышает значение для кварцевого стекла. Для теллуритных стёкол (на основе TeO_2) n_2 увеличивается в десятки раз, а для халькогенидных стёкол – на 2-3 порядка по сравнению с плавленым кварцем. Теллуритные и халькогенидные стёкла открывают широкие перспективы для микрорезонаторной оптики, но их полный потенциал еще не раскрыт. На сегодняшний день в ряде мировых лабораторий разработаны технологии изготовления теллуритных и халькогенидных микрорезонаторов на чипе [6], что демонстрирует высокий практический, а не только фундаментальный интерес к таким устройствам.

Следует отметить, что для эффективной реализации многих нелинейно-оптических процессов, например, четырёхволнового взаимодействия или генерации оптических частотных гребёнок на его основе, помимо высокой нелинейности требуется выполнение определенных условий на дисперсию микрорезонаторов, вклад в которую дают и материальная, и геометрическая составляющие [4]. Изменяя геометрические параметры резонаторов, можно управлять дисперсией в широких пределах [4]. Поэтому исследование дисперсионных характеристик резонаторов из разных материалов с различными формами и размерами очень важно для задач микрорезонаторной оптики.

Далее следует обратить внимание на хорошо известную проблему, связанную с действием термооптической нелинейности. Из-за частичной термализации мощности лазерного излучения происходит повышение температур, вследствие которого наблюдается локальное изменение показателя преломления. В протяженной среде это может приводить к самофокусировке пучка, на что впервые было обращено внимание в работе [7]. В микрорезонаторах термооптический эффект приводит к сильной зависимости собственных частот МШГ от интенсивности накачки и к нелинейной деформации резонансных кривых [8]. Несмотря на то, что зачастую тепловая нелинейность является паразитной, в ряде ситуаций её можно эффективно использовать, например, для высокочувствительного детектирования температурных изменений [8]. Более того, с помощью контролируемого дополнительного источника нагрева можно реализовать управление целевыми нелинейно-оптическими преобразованиями частот. Следует отметить, что исследования термооптиче-

ских эффектов до сих пор не являются полными даже для кварцевых микросфер. Термооптические характеристики теллуритных и халькогенидных стёкол сильно отличаются от соответствующих характеристик кварцевого стекла, поэтому их исследование представляет отдельный интерес.

Наконец, переход от одиночных резонаторов к связанным системам, простейшей из которых является пара резонаторов, даёт новые степени свободы и обогащает нелинейную динамику системы. Эффекты на основе керровской нелинейности в связанных микрорезонаторах достаточно много обсуждаются в научной литературе [9], но в изучении термооптических процессов имеется значительный пробел.

Таким образом, исследование характеристик одиночных и связанных микрорезонаторов из различных стёкол и устройств на их основе, а также разработка методов термооптического управления нелинейно-оптическими процессами в микрорезонаторах представляют собой актуальное и перспективное направление исследований. Это открывает широкие возможности для совершенствования существующих микрорезонаторных устройств и обладает значительным практическим потенциалом.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование и оптимизация линейных и нелинейных характеристик одиночных и связанных микрорезонаторов с модами шепчущей галереи из различных стёкол и высокочувствительных сенсоров на их основе, а также разработка и исследование методов термооптического управления нелинейно-оптическими процессами преобразования лазерного излучения в микрорезонаторах.

Задачи диссертационной работы:

1. Теоретическое исследование и оптимизация дисперсионных и нелинейных характеристик сферически-симметричных микрорезонаторов на основе кварцевых, германатных, германосиликатных, теллуритных и халькогенидных оптических стёкол.

2. Разработка численных и аналитических моделей для исследования стационарных и динамических термооптических эффектов в сплошных микросферах с учётом реалистичных особенностей геометрии системы и неоднородностей тепловыделения.

3. Расчёт и сравнительный анализ характеристик высокочувствительных температурных сенсоров на основе микрорезонаторов из различных оптических стёкол с учётом возможности возбуждения различных мод, а также с учётом отклонения формы резонатора от идеального шара.

4. Разработка и теоретическое исследование методов термооптического управления нелинейно-оптическими процессами на основе вынужденного комбинационного (рамановского) рассеяния света в сплошных микросферах.

5. Теоретическое исследование процессов, обусловленных термооптической нелинейностью, в системе из двух связанных микрорезонаторов и высокочувствительных сенсоров на их основе.

Научная новизна

1. Впервые исследованы дисперсионные и нелинейные характеристики мод шепчущей галереи в сплошных микросферах на основе германосиликатного стекла и полых тонкостенных микросферах на основе халькогенидных (As_2S_3 и As_2Se_3) стёкол, а также в сплошных микросферах из кварцевого стекла с тонким покрытием из германосиликатного стекла; определены условия достижения околонулевой и аномальной ДГС для мод рассматриваемых микрорезонаторов на различных длинах волн накачки. Для кварцевых микросфер с германосиликатным покрытием впервые проведён анализ кривых синхронизма вырожденного четырёхволнового взаимодействия.

2. Впервые произведён расчёт и выполнен сравнительный теоретический анализ температурной чувствительности длин волн мод шепчущей галереи в сплошных микросферах на основе германатного, теллуритного и халькогенидных (As_2S_3 и As_2Se_3) стёкол; проанализировано влияние выбора рабочей моды, размера резонатора и отклонения формы рассматриваемых резонаторов от идеального шара на температурную чувствительность.

3. Предложен оригинальный способ, позволяющий с использованием вспомогательного лазерного диода включать/выключать непрерывную рамановскую генерацию в теллуритной микросфере, а также генерацию рамановских солитонов с контролируемой шириной спектра и рамановских «паттернов Тьюринга» в функционализированной кварцевой микросфере со специально нанесённым поглощающим покрытием.

4. Впервые детально исследованы стационарные и динамические эффекты в системе из двух связанных микрорезонаторов с термооптической нелинейностью при однонаправленной непрерывной накачке: определены области мультистабильности и бифуркационные диаграммы, проанализированы направления гистерезисных переключений между устойчивыми стационарными состояниями, вызываемых медленным сканированием частоты накачки, найдены области автоколебаний. Проанализировано влияние малой межмодовой отстройки между парциальными модами на структуру стационарных состояний и возможных гистерезисных переключений, предложена оригинальная концепция высокочувствительного детектора, работающего вблизи точки бифуркации.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы могут применяться в ряде российских научно-исследовательских и научно-образовательных организаций, та-

ких как ИПФ РАН, РКЦ, Сколтех, НГУ, ИАиЭ СО РАН, ИТМО, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и др.

Разработанные модели для исследования линейных и нелинейных характеристик одиночных и связанных микрорезонаторов и термооптических процессов в них, а также полученные с помощью них результаты могут использоваться для моделирования подобных систем и фотонных устройств на их основе.

Результаты диссертационной работы могут найти практическое применение при проектировании и разработке прототипов генераторов оптических частотных гребёнок для интеграции в системы прецизионных измерений, в навигационные системы, в метрологическое оборудование для контроля качества в высокотехнологичных производствах (микроэлектронике) и в другие интеллектуальные производственные технологии и роботизированные системы.

Результаты исследований термооптических процессов могут использоваться для разработки высокочувствительных миниатюрных датчиков температурных изменений окружающей среды, что может представлять особенный интерес для измерения локальных градиентных температурных полей на небольших пространственных масштабах. Эти результаты также могут быть востребованы для разработки термооптических систем управления нелинейно-оптическими преобразователями частот.

Методология и методы исследования

В работе использовались надежные и хорошо апробированные методы численного моделирования, проверенные на известных моделях. Для расчёта параметров микрорезонаторов на основе различных стёкол применялся хорошо известный электродинамический подход, основанный на решении характеристических уравнений, получаемых на основе системы уравнений Максвелла с учетом граничных условий, соответствующих конкретной конфигурации микрорезонатора. Моделирование термодинамической задачи нагрева и остывания одиночного микрорезонатора производилось методом конечных элементов в рамках уравнения теплопроводности. Моделирование нелинейных свойств системы из двух связанных микрорезонаторов производилось в рамках теории связанных мод, а линейных свойств системы – как в рамках теории связанных мод, так и с помощью конечноэлементного подхода в рамках уравнений Максвелла. Также применялись аналитические методы, позволяющие получать решения соответствующих уравнений в определённых приближениях.

Положения, выносимые на защиту

1. В сплошных кварцевых микросферах диаметром порядка 100 мкм с германосиликатным покрытием толщиной около 2 мкм можно получить около-

нулевую дисперсию групповых скоростей в широком диапазоне длин волн ~1.46…1.625 мкм. Данная конструкция микрорезонаторов расширяет возможности управления кривыми фазового синхронизма при вырожденном четырёхволновом взаимодействии по сравнению с микросферами без покрытия, обеспечивая диапазон перестройки частоты генерируемых волн до 78 ТГц (450 нм) при изменении частоты накачки всего на 3.8 ТГц (30 нм). Для некоторых параметров предложенных резонаторов условия синхронизма выполняются для двух и даже трех пар генерируемых волн, что невозможно для микросфер без покрытия.

2. Микросферы из халькогенидного стекла As_2Se_3 могут быть использованы в качестве сенсоров температуры с ожидаемой температурной чувствительностью длин волн МШГ ~57 пм/К (на длине волны 1.55 мкм), что в 6 раз превышает известное значение для кварцевых микросфер. Чувствительность таких микросенсоров практически не зависит от добротности микросферы и её размера (при радиусах микросфер $\geq$ 30 мкм), малых отклонений формы от сферической и выбора рабочей моды.

3. Включение/выключение непрерывной рамановской генерации в теллуритной микросфере, а также генерации рамановских солитонов с контролируемой шириной спектра и рамановских «паттернов Тьюринга» в функционализированной кварцевой микросфере со специально нанесенным поглощающим покрытием вблизи её полюса (вдали от рабочей МШГ) может быть осуществлено при помощи термооптического сдвига частоты рабочей моды относительно постоянной частоты узкополосной накачки при использовании вспомогательного лазерного диода.

4. В системе двух связанных микрорезонаторов с термооптической нелинейностью при однонаправленной непрерывной накачке при одних и тех же параметрах возможны до девяти стационарных состояний, при этом не более четырёх из них устойчивы. Даже малая расстройка между парциальными частотами резонаторов кардинально влияет на структуру стационарных состояний и возможных гистерезисных переключений между мультистабильными состояниями. На основе этого эффекта может быть реализован высокочувствительный детектор, работающий вблизи точки бифуркации.

Достоверность полученных результатов

Все представленные результаты диссертационного исследования являются достоверными и обоснованными. В работе применялись надежные и апробированные численные и аналитические методы и подходы. Разработанные алгоритмы и программы для численного моделирования тщательно тестировались на известных моделях. Для ряда теоретических результатов есть экспериментальная верификация. Положения и основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных журналах и под-

вергались оценке независимых экспертов. Результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были доложены автором лично на следующих конференциях, симпозиумах и научных школах:

- 19th and 20th International Conferences Laser Optics (ICLO 2020 and ICLO 2022), Санкт-Петербург (ноябрь 2020 и июнь 2022);
- IV, V, VI and VII International Conferences on Ultrafast Optical Science "UltrafastLight-2020", "UltrafastLight-2021", "UltrafastLight-2022", "UltrafastLight-2023", Москва (сентябрь-октябрь 2020, октябрь 2021, октябрь 2022, октябрь 2023);
- VII Школа-конференция молодых учёных «Прохоровские недели», Москва (октябрь 2024);
- Всероссийская научная конференция с международным участием «Невская Фотоника – 2023», Санкт-Петербург (октябрь 2023);
- I Самарцевские Чтения (ФЭКС/IWQO-2023), Светлогорск, Калининградская обл (сентябрь 2023);
- The International Summer Conference for Theoretical Physics (ISCTP-2023), Долгопрудный (июль 2023);
- 22nd International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices "NUSOD 2022", Turin, Italy (online) (сентябрь 2022);
- 29th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'22), Москва (сентябрь 2022);
- XVII Всероссийская конференция «Высокочистые вещества. Получение, анализ, применение» и X Школа молодых учёных «Особо чистые стёкла для волоконной оптики», Нижний Новгород (июнь 2022);
- International Symposium "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics" (NWP-2021), Нижний Новгород (сентябрь 2021);
- Международная научно-техническая конференция «Современная элементная база радиоэлектроники и её применение», Нижний Новгород (ноябрь 2018).

Результаты работы обсуждались на семинарах в ИПФ РАН, а также вошли в число лучших результатов ИПФ РАН 2024 года. Работа удостоена диплома II степени XXV Конкурса работ молодых учёных ИПФ РАН (2023 г.).

Работа поддержана стипендией Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов, проводящих научные исследования в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, определённых в стратегии научно-технического развития Российской Федерации. Результаты работы использовались при выполнении проектов в рамках следующих грантов: Мегагрант № 14.W03.31.0032 (075-15-2021-633),

НЦМУ «Центр фотоники» № 075-15-2020-906 (075-15-2022-316), РНФ 20-72-10188-П, РНФ 20-72-10188, РНФ 18-72-00176.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 17 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых базами Scopus и Web of Science, в том числе, в “Physical Review E”, “IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics”, “IEEE Access”, “IEEE Photonics Technology Letters”, “Results in Physics”, “Sensors” (3 статьи), “Micromachines” (2 статьи), “Photonics” (5 статей), “Journal of Non-Crystalline Solids” и “Quantum Electronics”.

Личный вклад автора

Все теоретические результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором или при его непосредственном участии. Постановка задач, определение подходов к их решению, анализ, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем Е. А. Анашкиной, а также с А. В. Андриановым. Обсуждение и интерпретация результатов, полученных при исследовании нелинейных термооптических эффектов в системе связанных микрорезонаторов (глава 3) также происходило совместно с А. В. Юлиным. Экспериментальные данные, использованные для верификации теоретических результатов автора, получены и предоставлены А. В. Андриановым.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и списка статей автора по теме диссертации. Диссертация изложена на 147 страницах, включает 55 рисунков, 6 таблиц. Список литературы содержит 119 наименований, список статей автора в рецензируемых журналах по теме диссертации содержит 17 наименований [A1–A17].

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, аргументированы новизна и научная и практическая значимость работы, описаны методология и методы исследования, представлены выносимые на защиту положения, обоснована достоверность полученных результатов, приведены данные об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объёме диссертации.

Глава 1 посвящена вопросам управления дисперсионными характеристиками МШГ сферических микрорезонаторов различной геометрии (сплошные

микросферы, полые тонкостенные микросферы, сплошные микросферы с тонким покрытием) на основе различных оптических стёкол [А1–А9].

В **разделе 1.1** вводится проблема управления дисперсией групповых скоростей (ДГС) $\beta_2 = d^2k/d\omega^2$ (k – волновое число, $\omega = 2\pi c/\lambda$ – циклическая частота, c – скорость света в вакууме, λ – длина волны излучения), которая важна для задач нелинейно-оптического преобразования излучения в микрорезонаторах. Например, получение околонулевой *аномальной* ДГС $\beta_2 \lesssim 0$ может способствовать реализации эффектов на основе вырожденного четырёхволнового взаимодействия (ЧВВ), включая генерацию оптических частотных гребёнок (ОЧГ) [4]. Вклад в дисперсию МШГ вносят как форма и размер микрорезонатора, так и характеристики материала. Удобно ввести длину волны нулевой ДГС λ_{ZD} ($\beta_2(\lambda_{ZD}) = 0$); при этом для рассматриваемых оптических стёкол режим аномальной ДГС достигается при $\lambda > \lambda_{ZD}$.

Моды сферических микрорезонаторов бывают TM- и TE-поляризаций и нумеруются тремя индексами (радиальным $q \geq 1$, полярным $l \geq 0$ и азимутальным $|m| \leq l$). МШГ – это моды с $l \gg 1$, $l - |m| \ll l$ и $q \ll l$; они локализованы в приповерхностной области микросфер вдоль их «экватора». Для анализа свойств МШГ в работе применялся подход, основанный на численном решении характеристических уравнений [3, А3, А7, А8]. Для этого был разработан численный код, основанный на модифицированном методе Пауэлла. В расчётах учитывалась материальная дисперсия стёкол $n(\lambda)$.

В **разделе 1.2** были исследованы дисперсионные свойства сплошных микросфер. Были проведены расчёты зависимостей $\beta_2(\lambda)$ для микрорезонаторов на основе различных оптических стёкол: кварцевого (SiO_2, $\lambda_{ZD} = 1.28$ мкм), германатного (GeO_2, $\lambda_{ZD} = 1.75$ мкм), теллуритного (TeO_2–WO_3–La_2O_3 (TWL), $\lambda_{ZD} = 2.2$ мкм) и халькогенидных As_2S_3 ($\lambda_{ZD} = 4.9$ мкм) и As_2Se_3 ($\lambda_{ZD} = 7.2$ мкм). Показано, что λ_{ZD} может быть смещена только в длинноволновую область относительно λ_{ZD} стекла, причём это смещение увеличивается как с уменьшением радиуса микросферы R, так и с увеличением q, а отличия для мод TE- и TM-поляризаций незначительны.

В сплошных кварцевых микросферах может быть получена аномальная ДГС при $\lambda \approx 1.55$ мкм, что делает перспективным их использование для телекоммуникаций. Было показано, что SiO_2 микросферы радиусом $R \approx 82$ мкм и $R \approx 164$ мкм могут применяться в качестве источников ОЧГ для пассивных оптических сетей с мультиплексированием с разделением по длинам волн (WDM-PON) за счёт подходящих значений β_2 и межмодового интервала ΔF_{WGM} (400 ГГц и 200 ГГц соответственно) [А1, А2]. Также рассмотрены сплошные микросферы на основе германосиликатного ($(1-X)\cdot SiO_2 - X\cdot GeO_2$) стекла; рассчитанная зависимость $\lambda_{ZD}(X, R)$ для фундаментальных МШГ ($q = 1$, $l = |m|$) показана на рис. 1, *а*. В этом случае небольшая аномальная ДГС для микросфер с $R \approx 200$ мкм при накачке на 1.55 мкм достигается при $X \leq 0.2$, а при накачке на 2.0 мкм – при $X \geq 0.8$ [А3]. Используя полученные

результаты ($\beta_2(\lambda)$), соавторы численно показали возможность генерации ОЧГ в таких микрорезонаторах [А3].

Ключевую роль в задачах нелинейно-оптического преобразования излучения в $\chi^{(3)}$ микрорезонаторах играют процессы вырожденного ЧВВ, при которых происходит распад двух квантов накачки с частотой ω_p на два кванта выходного излучения с частотами $\omega_{+,-} = \omega_p \pm \Omega$ [10]. Для реализации этих процессов необходимо обеспечение фазового синхронизма между взаимодействующими волнами. Условие наиболее эффективного фазового синхронизма может быть записано следующим образом [10; А4]:

$$L\sum_{j\geq 1}\frac{\beta_{2j}\Omega^{2j}}{2j!} + 2\gamma PL - \delta_0 = 0, \qquad (1)$$

где $L = 2\pi R$, $\beta_j = d^j k/d\omega^j$ – параметр дисперсии j-го порядка, γ – нелинейный керровский коэффициент, P – внутрирезонаторная мощность, δ_0 – отстройка частоты накачки от резонансной частоты МШГ. Рассчитанные кривые фазового синхронизма $\lambda_{+,-}(\lambda_p)$ для сплошных SiO_2 микросфер приведены на рис. 1, *б*; их конфигурацией можно управлять путём изменения R, что иллюстрирует тесную связь с задачей управления ДГС [А4].

Моды идеальных микросфер вырождены по индексу m. В экспериментальных условиях форма резонаторов может немного отличаться от сферической, что приводит к снятию вырождения и большой спектральной плотности мод. Это оказывается критически важным для реализации некоторых нелинейно-оптических процессов, невозможных в идеальных микросферах. В частности, в теллуритной микросфере диаметром ~75 мкм это способствовало реализации каскадной генерации в результате эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ), несмотря на то, что частотный сдвиг ВРМБ для теллуритного стекла (~9 ГГц) на порядки меньше, чем величина ΔF_{WGM} микросферы (~600 ГГц) [А5]. Помимо этого, изменения ДГС мод, вызванные неидеальностью формы микрорезонатора, могут способствовать генерации ОЧГ с кратным ΔF_{WGM} частотным интервалом вследствие формирования рамановских «паттернов Тьюринга» [А6].

Далее в **разделе 1.3** были исследованы и оптимизированы дисперсионные свойства фундаментальных МШГ полых тонкостенных микросфер на основе рассматриваемых стёкол в зависимости от их геометрических параметров – радиуса R и толщины стенки b. Получено, что в этой системе λ_{ZD} может быть смещена как в длинноволновую, так и в коротковолновую стороны относительно λ_{ZD} материала, что делает возможным достижение небольшой аномальной ДГС в полых TWL микросферах при накачке на 2.0 мкм и 2.3 мкм, а также в полых As_2S_3 микросферах при накачке на 3.5 мкм [А7; А8]. Используя полученные в настоящей работе дисперсионные характеристики, соавторы показали возможность генерации ОЧГ в таких системах [А7; А8].

Так как в сплошных микросферах λ_{ZD} может быть смещена только в длинноволновую сторону, а в полых микросферах это ограничение отсутствует, в **разделе 1.4** было предложено исследовать дисперсионные свойства

сплошных SiO_2-микросфер (радиусом R) с тонким покрытием толщиной b из германосиликатного стекла $(1-X)\cdot SiO_2–X\cdot GeO_2$ [A9]. Предполагалось, что в такой системе совокупное влияние геометрической дисперсии от сплошной микросферы и тонкого покрытия смогут скомпенсировать материальную ДГС в широком спектральном диапазоне.

Была выполнена оптимизация параметров микрорезонаторов для достижения околонулевой аномальной ДГС в телекоммуникационном S-C-L-диапазоне (1.46…1.625 мкм). Расчёты производились на сетке параметров с шагом $dX = 0.1$, $dR = 10$ мкм, $db = 0.1$ мкм. Отклонения оптимизированных дисперсионных зависимостей от целевой ($\beta_2 = -2$ пс^2/км) оказались существенно меньше, чем для сплошных SiO_2 микросфер без покрытия (рис. 1, *в*). Получено, что ΔF_{WGM} таких микросфер практически не зависит от b и определяется R и X. Это позволило найти конфигурации, одновременно обеспечивающие $\beta_2 \lesssim 0$ в широком диапазоне и ΔF_{WGM}, подходящие для создания WDM-PON: $\Delta F_{WGM} = 200$ ГГц ± 1% ($R = 150$ мкм, $b = 1.6$ мкм, $X = 0.8$) и $\Delta F_{WGM} = 300$ ГГц ± 1% ($R = 100$ мкм, $b = 1.6$ мкм, $X = 0.8$).

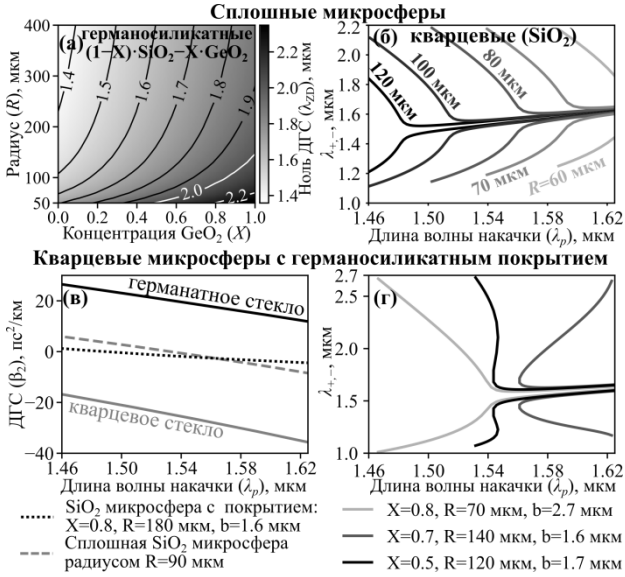


Рис. 1. λ_{ZD} германосиликатных микросфер в зависимости от их параметров (*а*) [A3]. Примеры кривых фазового синхронизма вырожденного ЧВВ (формула (1)) для SiO_2 микросфер без покрытия (*б*) [A4]. ДГС SiO_2 микросфер с покрытием и без него, обеспечивающих близкую к $\beta_2 = -2$ пс^2/км ДГС в S-C-L-диапазоне (*в*) [A9]. Примеры кривых фазового синхронизма вырожденного ЧВВ для SiO_2 микросфер с германосиликатным покрытием (*г*) [A9]

Далее в этой системе были рассмотрены условия фазового синхронизма вырожденного ЧВВ (1). Получено, что возможны 3 различных конфигурации кривых фазового синхронизма (рис. 1, *г*). Случай 1 (светло-серая кривая) аналогичен сплошным SiO_2 микросферам: синхронизм обеспечивается в силу баланса β_2 и керровской нелинейности. В случаях 2 и 3 (тёмно-серая и чёрная кривые) $\beta_2 \approx 0$ в широком диапазоне, и условие (1) может выполняться для 2 и даже 3 пар генерируемых волн за счёт баланса нелинейности и β_4 (случай 2)

или β_6 (случай 3). Случай 3 обеспечивает высокую чувствительность частот генерируемого излучения к изменениям частоты накачки: наибольший диапазон перестройки их частот составляет 78 ГГц (450 нм) при изменении частоты накачки всего на 3.8 ГГц (30 нм, λ_p = 1.532…1.562 мкм) и достигается для резонатора с X = 0.5, R = 120 мкм, b = 1.7 мкм.

Глава 2 посвящена вопросам термооптики сплошных микросфер из различных стёкол, в частности, задаче расчёта термооптических сдвигов частот МШГ вследствие частичного поглощения накачки, а также возможности практического применения тепловой нелинейности в микрорезонаторах: разработке сенсоров температуры и методов внешнего термооптического управления нелинейно-оптическими процессами в таких системах [A2; A6; A10–A16].

В **разделе 2.1** дана вводная информация о термооптических эффектах в микрорезонаторах с МШГ.

В **разделе 2.2** исследуется задача нагрева микрорезонатора из-за частичного поглощения излучения накачки, что особенно важно для микросфер из теллуритных и халькогенидных стёкол, отличающихся сравнительно невысокими температурами стеклования [5]. Для этого была разработана численная конечноэлементная модель, учитывающая, что в экспериментальных условиях микросфера расположена на конце отрезка оптического волокна, а тепловыделение мощностью P_{heat} происходит только в области МШГ [A2; A10–A12]. На основе проведённых расчётов были сформулированы рекомендации на допустимые R и P_{heat} для теллуритных и халькогенидных микросфер [A11; A12]. Также была рассмотрена динамическая задача нагрева/остывания микрорезонатора при резком включении/выключении накачки. Показано, что характерное время температурной релаксации τ_T может быть оценено как $\tau_T \approx \rho c_p R^2/(3k_{air})$, где ρ – плотность стекла, c_p – удельная теплоёмкость стекла, k_{air} – коэффициент теплопроводности воздуха [A12]. При этом область моды остывает на порядки быстрее τ_T, что объясняется её малыми размерами [A13].

В **разделе 2.3** рассматривается задача расчёта тепловых сдвигов частот МШГ. В разработанной модели «горячие» собственные частоты рассчитываются из характеристического уравнения с учётом изменения радиуса микросферы $R(\Delta T)$ за счёт эффекта теплового расширения и температурной зависимости показателя преломления стекла $n(\Delta T,\lambda)$. Были проведены расчёты для микросфер из различных стёкол в широком диапазоне параметров; получено, что сдвиги длин волн МШГ $\Delta\lambda \propto P_{heat}/R$, а изменения дисперсии несущественны. Результаты для теллуритных и халькогенидных As_2S_3 микросфер были экспериментально верифицированы соавторами [A10; A12].

Раздел 2.4 посвящён разработке и сравнительному анализу сенсоров температуры на основе сплошных микросфер. Принципиальная схема такого сенсора показана на рис. 2, *а*: предполагается, что широкополосная накачка низкой мощности заводится в резонатор с помощью тонкой волоконной перетяжки. В выходном спектре частоты МШГ проявляются как провалы, сдви-

гающиеся при изменении температуры резонатора (рис. 2, *б*, *в*). Был проведён сравнительный анализ температурной чувствительности длин волн $d\lambda/dT$ МШГ микросфер на основе различных стёкол (SiO_2, GeO_2, TWL, As_2S_3 и As_2Se_3) в широком температурном диапазоне [A14].

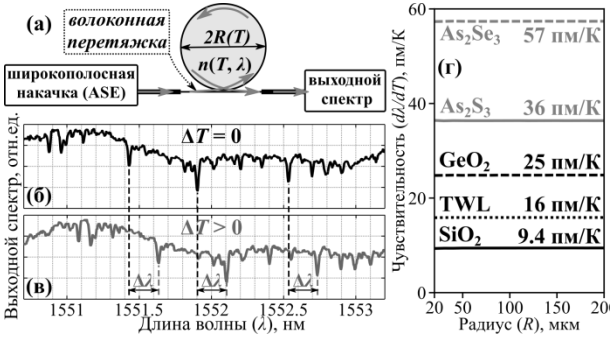


Рис. 2. Сенсоры температуры на основе микросфер. Принципиальная схема (*а*). Пример измерения сдвига длин волн МШГ ($\Delta\lambda$) (*б*, *в*) [A10]. Рассчитанная температурная чувствительность МШГ ($d\lambda/dT$) в зависимости от радиуса микросфер (T = 20°C, λ = 1.55 мкм) (*г*) [A14]

Наибольшие значения $d\lambda/dT$ при комнатной температуре ($\lambda \approx 1.55$ мкм) достигаются для микросфер из As_2Se_3 стекла и составляют 57 пм/К, что в 6 раз выше, чем для микросфер из кварцевого стекла (9.4 пм/К). Показано, что $d\lambda/dT$ практически не зависит от радиуса микросфер (рис. 2, *г*), малых отклонений формы резонатора от сферической и выбора рабочей МШГ (при $R \geq 30$ мкм относительные вариации составляют < 0.3 % для теллуритных и халькогенидных микросфер), что подчёркивает практичность рассматриваемых микросенсоров [A14].

В **разделе 2.5** предложен метод термооптического управления рамановскими процессами [A15; A16]. В эксперименте для настройки на «горячий» резонанс можно сканировать длину волны накачки λ_p вблизи «холодного» резонанса (λ_0) при $\lambda_p \lesssim \lambda_0$. Однако этот метод требует использования перестраиваемого лазера накачки. Предложенный в настоящей работе метод снимает это ограничение и основан на сканировании λ_0 при $\lambda_p = const$, что может быть осуществлено за счёт термализации излучения управляющего диода регулируемой мощности P_{aux}. При изменении P_{aux} температура микрорезонатора изменяется, что приводит к термооптическому сдвигу частот МШГ $\Delta f(P_{aux})$; это позволяет контролировать частотную отстройку накачки, управляя нелинейно-оптическими процессами преобразования излучения.

Для теллуритных микросфер в качестве управляющего диода может быть использован дешёвый лазерный диод с длиной волны излучения λ_{aux} = 405 нм, для которого теллуритное стекло непрозрачно (рис. 3, *а–д*). Были проведены расчёты термооптического сдвига частот МШГ $\Delta f(P_{aux})$ (рис. 3, *б*). В эксперименте, проведённом соавторами, было показано, что эта схема может быть использована для включения/выключения непрерывной рамановской генерации при $\lambda_p = const$ и $P_p = const$ (рис. 3, *в–д*) [A15].

Аналогичная схема была реализована в кварцевой микросфере: для термализации излучения управляющего диода ($\lambda_{aux} \approx 980$ нм) на «приполярную» область микросферы (рис. 3, *е*) было нанесено поглощающее покрытие [А16]. Были проведены расчёты сдвига частот МШГ Δf в зависимости от относительной температуры покрытия ΔT_{ext} и термализованной мощности накачки P_{heat} (рис. 3, *ж*); получено, что совокупное влияние ΔT_{ext} и P_{heat} близко к аддитивному. В эксперименте, проведённом соавторами, было показано, что, последовательно уменьшая мощность управляющего диода P_{aux}, можно переходить к различным режимам рамановских процессов: от генерации рамановских солитонов с контролируемой шириной спектра к многомодовой и одномодовой рамановской генерации (рис. 3, *з–л*) [А16]. Также в этой системе при выборе другой рабочей моды с помощью того же метода было осуществлено термооптическое включение/выключение рамановских «паттернов Тьюринга», о которых упоминалось в разделе 1.2 [А6].

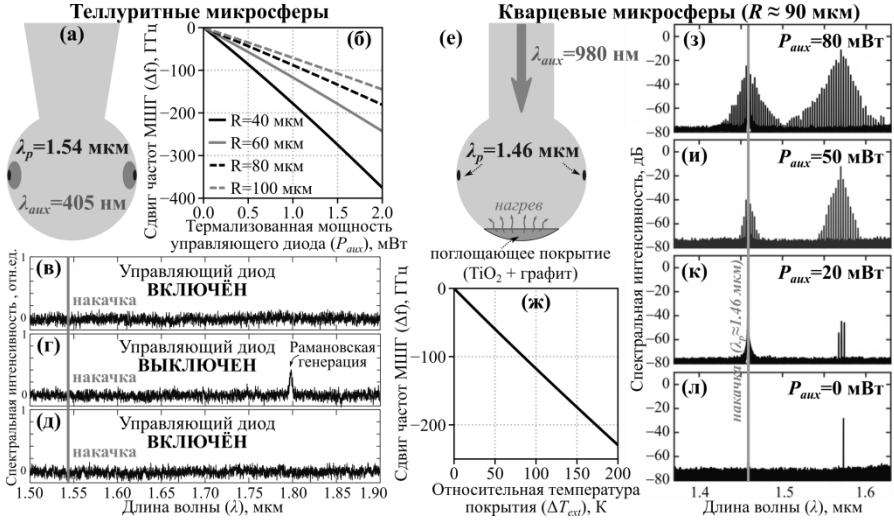


Рис. 3. Термооптическое управление рамановскими процессами в теллуритных (*а–д*) и кварцевых (*е–л*) микросферах за счёт использования вспомогательных лазерных диодов [А15; А16]. Принципиальные схемы систем (*а*, *е*). Рассчитанные зависимости частотного сдвига МШГ от P_{aux} (б) и ΔT_{ext} (ж) в соответствующих микросферах (*б*, *ж*). Экспериментальные спектры, полученные соавторами, демонстрирующие включение/выключение непрерывной рамановской генерации при выключении/включении управляющего диода в теллуритной микросфере (*в–д*), а также рамановскую генерацию в различных режимах при изменении P_{aux} в кварцевой микросфере (*з–л*)

Глава 3 посвящена анализу системы из двух связанных микрорезонаторов из кварцевого стекла с термооптической нелинейностью [А17]. Рассматриваемая система состоит из двух близко расположенных сплошных микро-

резонаторов с $R \approx 25$ мкм и двух волоконных перетяжек вблизи каждого из резонаторов. Излучение накачки с частотой ω ($\lambda \approx 1.55$ мкм) заводится через перетяжку 1 (около резонатора 1), а выводится через перетяжки 1 и 2.

В **разделе 3.1** содержится введение к третьей главе диссертации.

В **разделе 3.2** рассматривается гибридизация МШГ в линейном случае. Для вычисления реалистичных параметров мод используется комбинация двух подходов: анализа с помощью уравнений теории связанных мод (СМТ) и конечноэлементного моделирования уравнений Максвелла в 2D [A17]. Найдены конкретные конфигурации, обеспечивающие добротность парциальных МШГ $Q \approx 5 \cdot 10^5$ и межмодовый коэффициент связи $\kappa \approx 2\pi \cdot 833$ МГц.

В **разделе 3.3** описывается численная модель для анализа нелинейных термооптических эффектов в системе, основанная на расширенной системе уравнений СМТ, учитывающей температурную зависимость частот парциальных мод и конечное время температурной релаксации $\tau_T \approx 12.9$ мс. В безразмерном виде система уравнений имеет следующий вид [A17]:

$$\begin{cases} \frac{da_1}{dt'} = (-1 - i\Delta + i\theta_1)a_1 + iCa_2 + \sqrt{F} \\ \frac{da_2}{dt'} = (-1 - i(\Delta + \delta) + i\theta_2)a_2 + iCa_1, \\ \frac{d\theta_{1,2}}{dt'} = \varepsilon_T \left(-\theta_{1,2} + |a_{1,2}|^2\right) \end{cases} \quad (2)$$

где $a_{1,2}$ – комплексные амплитуды мод, $t' = t/\tau$, t – время, $\tau \approx 0.85$ нс – время жизни фотона в резонаторе, $\Delta = \tau \cdot (\omega_{10} - \omega)$ – отстройка накачки, $\delta = \tau \cdot (\omega_{20} - \omega_{10})$ – межмодовая отстройка, $\omega_{10,20}$ – «холодные» парциальные частоты МШГ, $C = \kappa \cdot \tau$ – безразмерный коэффициент связи, $\varepsilon_T = \tau/\tau_T$, F – нормированная мощность накачки, $\theta_{1,2}$ – нормированные изменения температур резонаторов. Из-за сильно отличающихся временных масштабов оптических и тепловых процессов, а также устойчивости оптической подсистемы, динамический анализ производился в адиабатическом приближении: предполагалось, что установление $a_{1,2}$ происходит существенно быстрее изменений $\theta_{1,2}$, что позволяет заменить оптические уравнения на их решения при $\theta_{1,2} = const$ и оставить только уравнения на эволюцию $\theta_{1,2}$.

В **разделе 3.4** проведён анализ стационарных состояний системы из двух идентичных микрорезонаторов ($\delta = 0$) в зависимости от параметров накачки (Δ и F), определена их устойчивость. Получено, что в системе возможны до 9 стационарных состояний, из которых не более 4 устойчивы. Это кардинально отличает рассматриваемую систему от одиночного микрорезонатора, где число стационарных состояний ограничено 3, из которых устойчивы не более 2. Найденные области мультистабильности и стационарные состояния системы показаны на рисунке 4. При анализе были найдены седло-узловые бифуркации, бифуркации Андронова – Хопфа и седловые гомоклинические бифуркации (бифуркации петли сепаратрисы седла). Определены направления гистерезисных переключений между устойчивыми стационарными состояниями, вызываемых медленным сканированием Δ. Получено, что при $\delta = 0$ не все

устойчивые ветки достижимы медленным сканированием Δ (см. ветки S_5S_4 и A_3S_6 на рис. 4, *г*, *д*) [A17].

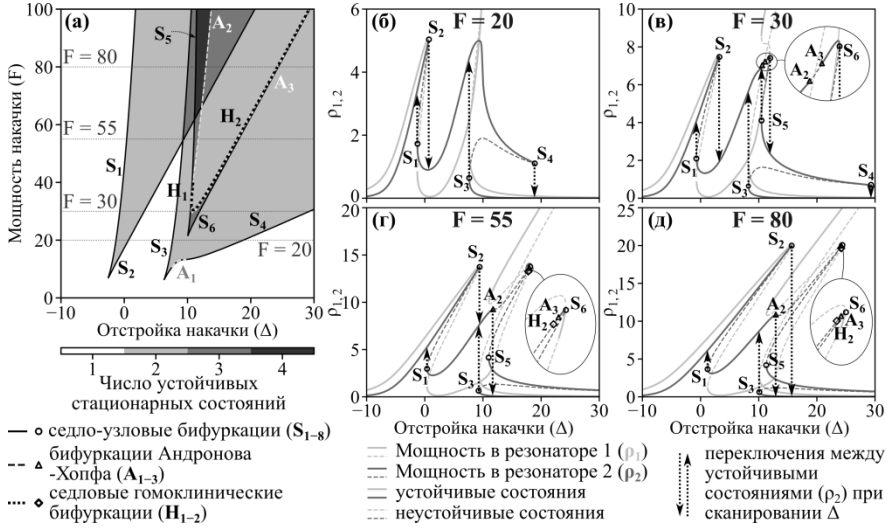


Рис. 4. Мультистабильность в системе из двух идентичных связанных микрорезонаторов с термооптической нелинейностью (δ = 0). (*а*). Число устойчивых стационарных состояний в зависимости от нормированных параметров накачки (Δ и *F*) (*б–д*). Стационарные состояния системы в зависимости от Δ при различных *F* и направления гистерезисных переключений между устойчивыми состояниями при медленном сканировании Δ (стрелками). Бифуркации показаны линиями (*а*) и маркерами (*б–д*), а также подписаны заглавными латинскими буквами [A17]

В **разделе 3.5** исследован случай взаимодействия мод с немного отличающимися «холодными» частотами ($\delta \neq 0$), проанализированы стационарные состояния системы, их устойчивость, а также направления гистерезисных переключений при сканировании Δ. Показано, что величина и знак δ существенно влияют как на структуру стационарных состояний системы, так и на реализуемые направления переключений. На основе этого эффекта предложена концепция высокочувствительного детектора, работающего вблизи точки бифуркации. Принципиальная схема устройства показана на рис. 5, *а*: детектируемый объект имеет доступ только к резонатору 2, и при контакте с ним ω_{20} сместится на $d\omega_{20}$, что приведёт к изменению δ. Если система настроена вблизи точки бифуркации (например, с помощью микронагревателя около резонатора 1), то даже малое изменение δ отразится в выходных спектрах при сканировании частоты лазера накачки (рис. 5, *б*, *в*). Такая схема позволяет детектировать $d\omega_{20}$ существенно меньше, чем ширина линии, что невозможно для детекторов на основе одиночных микрорезонаторов.

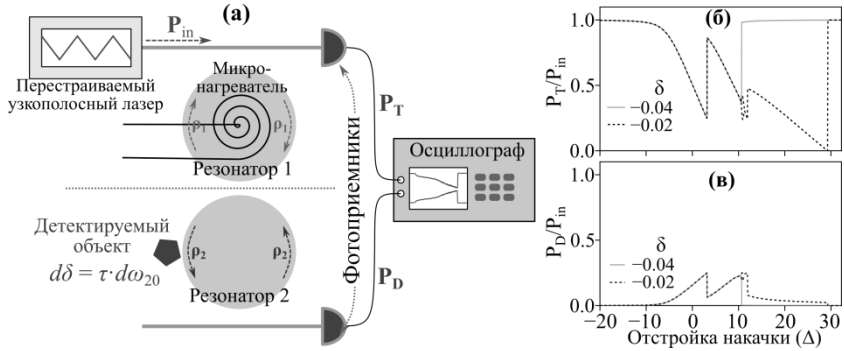


Рис. 5. Принципиальная схема детектора (*а*) на основе системы из двух связанных микрорезонаторов с термооптической нелинейностью (при ($\delta \neq 0$)). Теоретически рассчитанные спектры выходных мощностей ($F = 30$) вблизи точки бифуркации (*б, в*) [A17]

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что в сплошных микросферах при уменьшении их диаметра происходит плавный сдвиг длины волны нулевой дисперсии (λ_{ZD}) в длинноволновую область относительно λ_{ZD} материала. В полых тонкостенных микросферах путём выбора их диаметра и толщины можно добиться смещения λ_{ZD} как в длинноволновую, так и в коротковолновую сторону относительно λ_{ZD} материала. Для фундаментальных TE-мод полых микросфер с внутренним радиусом 100 мкм и толщиной стенки 2 мкм λ_{ZD} составляет 0.97 мкм для микрорезонаторов из кварцевого стекла ($\lambda_{ZD} = 1.28$ мкм), 1.23 мкм – из германатного стекла ($\lambda_{ZD} = 1.75$ мкм), 1.84 мкм – из теллуритного стекла ($\lambda_{ZD} = 2.2$ мкм), 3.0 мкм – из халькогенидного As_2S_3 стекла ($\lambda_{ZD} = 4.9$ мкм), 4.1 мкм – из халькогенидного As_2Se_3 стекла ($\lambda_{ZD} = 7.2$ мкм).

2. Продемонстрировано, что в предложенных кварцевых микросферах диаметром порядка 100 мкм с германосиликатным покрытием толщиной около 2 мкм при оптимальных параметрах можно получить околонулевую дисперсию в широком диапазоне длин волн 1.46…1.625 мкм. Показано, что данная конструкция микрорезонатора предоставляет исключительные возможности для управления кривыми фазового синхронизма при вырожденном четырёхволновом взаимодействии. Обнаружено, что для некоторых параметров резонатора условия синхронизма выполняются для двух и даже трёх пар генерируемых волн. Показано, что диапазон перестройки их частот может достигать 78 ТГц (450 нм) при изменении частоты накачки всего на 3.8 ТГц (30 нм), что значительно превосходит диапазон перестройки для обычных кварцевых микросфер.

3. В результате сравнительного анализа температурной чувствительности длин волн МШГ ($d\lambda/dT$) микросфер из кварцевого (SiO_2), германатного (GeO_2), теллуритного (TeO_2–WO_3–La_2O_3) и халькогенидных (As_2S_3 и As_2Se_3) стёкол показано, что наибольшее значение $d\lambda/dT$ = 57 пм/К на длине волны 1.55 мкм достигается для микросфер из стекла As_2Se_3, что в 6 раз выше значения для кварцевых микросфер, равного 9.4 пм/К, в то время как температурные чувствительности для микросфер из стёкол As_2S_3, GeO_2, TeO_2–WO_3–La_2O_3 составляют 36 пм/К, 25 пм/К и 16 пм/К соответственно. Продемонстрировано, что температурная чувствительность рассмотренных микросфер практически не зависит от их добротности и размера (при радиусах ≥30 мкм), малых отклонений формы от сферической и выбора рабочей моды.

4. Предложен способ, позволяющий с использованием вспомогательного лазерного диода включать/выключать непрерывную рамановскую генерацию в теллуритной микросфере, а также генерацию рамановских солитонов с контролируемой шириной спектра и рамановских «паттернов Тьюринга» в функционализированной кварцевой микросфере со специально нанесенным поглощающим покрытием вблизи её полюса (вдали от рабочей МШГ). Найдены температурные поля, возникающие в данных микрорезонаторах при термализации излучения вспомогательного диода и лазера накачки. На их основе вычислены соответствующие отстройки частот МШГ относительно частоты узкополосной накачки, необходимые для объяснения указанных режимов рамановской генерации.

5. В системе двух связанных микрорезонаторов с термооптической нелинейностью при однонаправленной непрерывной накачке показано, что при одних и тех же параметрах возможны до девяти стационарных состояний, при этом не более четырёх из них устойчивы. Построены бифуркационные диаграммы; определены нетривиальные гистерезисные переключения между устойчивыми стационарными состояниями, вызываемые медленным сканированием частоты накачки; найдены области автоколебаний. Показано, что даже малая расстройка между парциальными частотами резонаторов кардинально влияет на структуру стационарных состояний и возможных гистерезисных переключений. На основе этого эффекта предложена схема высокочувствительного детектора, работающего вблизи точки бифуркации.

Таким образом, полученные в диссертационной работе результаты создают основу для разработки прототипов новых компактных фотонных устройств на базе стеклянных микрорезонаторов, в том числе нелинейно-оптических преобразователей лазерного излучения и высокочувствительных сенсоров с улучшенными характеристиками. Дальнейшее развитие темы может быть связано непосредственно с разработкой и исследованием таких устройств для конкретных приложений, а также с переходом к системам на основе единичных и связанных микрорезонаторов других геометрий.

Список литературы

1. Kippenberg, T. J. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators / T. J. Kippenberg, A. L. Gaeta, M. Lipson et al. // Science. – 2018. – Vol. 361. – P. eaan8083.
2. Foreman, M. R. Whispering gallery mode sensors / M. R. Foreman, J. D. Swaim, F. Vollmer // Adv. Opt. Photon. – 2015. – Vol. 7, no. 2. – P. 168.
3. Городецкий, М. Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью: учебное пособие / М. Л. Городецкий. – М. : Физматлит, 2011. – 416 с.
4. Fujii, S. Dispersion engineering and measurement of whispering gallery mode microresonator for Kerr frequency comb generation / S. Fujii, T. Tanabe // Nanophotonics. – 2020. – Vol. 9, no. 5. – P. 1087–1104.
5. Tao, G. Infrared fibers / G. Tao, H. Ebendorff-Heidepriem, A. M. Stolyarov et al. // Advances in Optics and Photonics. – 2015. – Vol. 7, № 2. – P. 379–458.
6. Xia, D. Reconfigurable chalcogenide integrated nonlinear photonics / D. Xia, L. Luo, L. Wang // Nature Communications. – 2025. – Vol. 16, no. 1. – P. 10133.
7. Литвак, А. Г. О самофокусировке мощных световых пучков, связанной с тепловыми эффектами / А. Г. Литвак // Письма в ЖЭТФ. – 1966. – Т. 4, вып. 9. – С. 341–345.
8. Jiang, X. Optothermal Dynamics in Whispering-Gallery Microresonators / X. Jiang, L. Yang // Light Sci. Appl. – 2020. – Vol. 9. – P. 24.
9. Jang, J.K. Synchronization of coupled optical microresonators / J. K. Jang, A. Klenner, X. Ji et al. // Nature Photon. – 2018. – Vol. 12, no. 11. – P. 688–693.
10. Sayson, N. L. B. Widely tunable optic parametric oscillation in a Kerr microresonator / N. L. B Sayson, K. E. Webb, S. Coen, M. Erkintalo, S. G. Murdoch // Optics Letters. – 2017. – Vol. 42. – P. 5190–5193.

Список статей автора по теме диссертационного исследования

A1. Spolitis, S. IM/DD WDM-PON Communication System Based on Optical Frequency Comb Generated in Silica Whispering Gallery Mode Resonator / S. Spolitis, R. Murnieks, L. Skladova, T. Salgals, A. V. Andrianov, **M. P. Marisova** et al. // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 66335–66345.

A2. Anashkina, E. A. Microsphere-Based Optical Frequency Comb Generator for 200 GHz Spaced WDM Data Transmission System / E. A. Anashkina, **M. P. Marisova**, A. V. Andrianov et al. // Photonics. – 2020. – Vol. 7, no. 3. – P. 72.

A3. Anashkina, E. A. Development and numerical simulation of spherical microresonators based on SiO2-GeO2 germanosilicate glasses for generation of optical frequency combs / E. A. Anashkina, A. A. Sorokin, **M. P. Marisova**, A. V. Andrianov // Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 49, no. 4. – P. 371–376.

A4. Anashkina, E. A. Optical frequency combs generated in silica microspheres in the telecommunication C-, U-, and E-bands / E. A. Anashkina, **M. P. Marisova**, T. Salgals et al. // Photonics. – 2021. – Vol. 8, no. 9. – P. 345.

A5. Anashkina, E. A. Cascade Brillouin Lasing in a Tellurite-Glass Microsphere Resonator with Whispering Gallery Modes / E.A. Anashkina, **M. P. Marisova**, V. V. Dorofeev et al. // Sensors. – 2022. – Vol. 22, no. 8. – P. 2866.

A6. Anashkina, E. A. Raman Turing Patterns in an Optical Microresonator / E. A. Anashkina, **M. P. Marisova**, A. N. Osipov et al. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2024. – Vol. 30, no. 5. – P. 1–8.

A7. Anashkina, E. A. Development and numerical simulation of tellurite glass microresonators for optical frequency comb generation / E. A. Anashkina, A. A. Sorokin, **M. P. Marisova**, A. V. Andrianov // J. Non-Cryst. Solids. – 2019. – Vol. 522. – P. 119567.

A8. Anashkina, E. A. Numerical Simulation of Mid-Infrared Optical Frequency Comb Generation in Chalcogenide As2S3 Microbubble Resonators / E. A. Anashkina, **M. P. Marisova,** A. A. Sorokin, A. V. Andrianov // Photonics. – 2019. – Vol. 6, no. 2. – P. 55.

A9. **Marisova, M. P.** Dispersion Tailoring and Four-Wave Mixing in Silica Microspheres with Germanosilicate Coating / M. P. Marisova, A. V. Andrianov, G. Leuchs, E. A. Anashkina // Photonics. – 2021. – Vol. 8, no. 11. – P. 473.

A10. Andrianov, A. V. Thermal shift of whispering gallery modes in tellurite glass microspheres / A. V. Andrianov, **M. P. Marisova**, V. V. Dorofeev, E. A. Anashkina // Results in Physics. – 2020. – Vol. 17. – P. 103128.

A11. Anashkina, E. A. Theoretical Study of Multicascade Raman Microlasers Based on TeO2–WO3–Bi2O3 Glass / E. A. Anashkina, **M. P. Marisova**, A. V. Andrianov // Photonics. – 2023. – Vol. 10, no. 10. – P. 1137.

A12. Andrianov, A.V. Thermo-Optical Sensitivity of Whispering Gallery Modes in As2S3 Chalcogenide Glass Microresonators / A. V. Andrianov, **M. P. Marisova**, E. A. Anashkina // Sensors. – 2022. – Vol. 22, no. 12. – P. 4636.

A13. Andrianov, A. V. Multiple Time Scale Thermo-Optical Nonlinear Response in Silica Spherical Microresonators / A. V. Andrianov, **M. P. Marisova**, E. A. Anashkina // IEEE Photonics Technol. Lett. – 2025. – Vol. 37, no. 15. – P. 809–812.

A14. **Marisova, M. P.** Comprehensive Numerical Analysis of Temperature Sensitivity of Spherical Microresonators Based on Silica and Soft Glasses / M. P. Marisova, A. V. Andrianov, E. A. Anashkina // Sensors. – 2023. – Vol. 23, no. 2. – P. 717.

A15. Anashkina, E. A. Raman Lasing in a Tellurite Microsphere with Thermo-Optical on/off Switching by an Auxiliary Laser Diode / E. A. Anashkina, **M. P. Marisova**, V. V. Dorofeev et al. // Micromachines. – 2023. – Vol.14, no. 9. – P.1796.

A16. Anashkina, E. A. Thermo-Optical Control of Raman Solitons in a Functionalized Silica Microsphere / E. A. Anashkina, **M. P. Marisova**, A. V. Andrianov // Micromachines. – 2022. – Vol. 13, no. 10. – P. 1616.

A17. **Marisova, M. P.** Multistable states of light in two coupled silica microresonators with dominating thermo-optical nonlinearity / M. P. Marisova, A. V. Andrianov, A. V. Yulin, et al. // Phys. Rev. E. – 2025. – Vol. 111. – P. 014203.

МАРИСОВА Мария Павловна

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ И ДИСПЕРСИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СФЕРИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СТЕКОЛ

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 28.09.2026 г.
Формат 60×90¹⁄₁₆. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 22 (2026).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46