

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Шитиков Артем Евгеньевич**

**Высокодобротные кристаллические микрорезонаторы с  
модами «шепчущей галереи» для ИК-фотоники**

Специальность 01.04.01

«Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена на кафедре физики колебаний физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

**Научный руководитель** – *Игорь Антонович Биленко*  
*д.ф.-м.н., доцент*

**Официальные оппоненты** – *Крыжановская Наталья Владимировна,*  
*д.ф.-м.н.,*  
*«Национальный исследовательский*  
*университет «Высшая школа экономики»,*  
*Зав. лабораторией*

*Самойленко Алексей Андреевич,*  
*к.ф.-м.н.,*  
*Всероссийский научно-исследовательский*  
*институт оптико-физических измерений,*  
*начальник сектора отделения голографии,*  
*оптической томографии,*  
*нанотехнологий и наноматериалов.*

*Мерзликин Александр Михайлович*  
*д.ф.-м.н.,*  
*Федеральное государственное бюджетное*  
*учреждение науки институт теоретической*  
*и прикладной электродинамики российской*  
*академии наук (ИТПЭ РАН),*  
*Зам. директора по научной работе*

Защита диссертации состоится «10» февраля 2022 г. в 15-30 на заседании диссертационного совета МГУ.01.12 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, Физический факультет МГУ, ауд. \_\_\_\_.

E-mail: igorkartashov@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/410570663/>

Автореферат разослан «\_\_» декабря 2021 г.

Ученый секретарь  
 диссертационного совета  
 к.ф.-м.н.

И.Н. Карташов

## Введение

С момента экспериментальной демонстрации высокодобротных оптических микрорезонаторов с модами "шепчущей галереи" В.Б. Брагинским, М.Л. Городецким и В.С. Ильченко в 1989 году [1] тематика микрорезонаторов привлекает все большее внимание научного сообщества. Моды типа "шепчущей галереи" (МШГ) или волны "шепчущей галереи" представляют собой бегущие волны, возбуждающиеся в системах, обладающих осевой симметрией, в результате полного внутреннего отражения. МШГ были продемонстрированы в различных исполнениях, включая интегральное, в различных материалах и широко применяются как в научной сфере, так и высокотехнологичной индустрии.

Для изготовления оптических микрорезонаторов используются кристаллические материалы и стекла с малыми оптическими потерями, такие как кристаллические фториды ( $MgF_2$ ,  $CaF_2$ ,  $BaF_2$  и другие), плавленый и кристаллический кварц, нитрид кремния, ниобат лития, кристаллический кремний и другие. Оптические микрорезонаторы с модами "шепчущей галереи" совмещают в себе малый объем моды с высокой добротностью, что делает их использование крайне привлекательным во многих практических приложениях [2].

МШГ резонаторы широко применяются для создания различных типов оптических фильтров, сенсоров, оптоэлектрических модуляторов и других приборов [3]. Уникальные особенности МШГ резонаторов делают их востребованными в таких актуальных и бурно развивающихся направлениях как оптоэлектроника, фотоника и радиофотоника.

Фотоника - область науки и техники, которая занимается изучением фундаментальных и прикладных аспектов генерации, излучения, передачи, модуляции, усиления, обработки, детектирования и распознавания оптических сигналов [4]. Фотонные устройства широко применяются в телекоммуникационной отрасли. Благодаря быстрдействию, четкости и помехоустойчивости сигнала фотонные схемы быстро заменяют электронные схемы в целом ряде приложений. Центральными областями исследований фотоники являются волоконная и интегральная оптика, в том числе нелинейная оптика, физика и технология полупроводниковых соединений, полупроводниковые лазеры, оптоэлектронные устройства, высокоскоростные электронные устройства.

Отдельной вехой в развитии микрорезонаторной тематики стало открытие возможности генерации когерентных оптических частотных гребенок, солитонов, в микрорезонаторах [5], что проторило дорогу к созданию чрезвычайно компактных устройств на основе этой технологии, таких как компактный источник двойной гребенки, малошумящий радиочастотный источник и синтезатор оптических частот.

Частотные гребенки, возникающие в микрорезонаторах при накачке непрерывным лазером, являются результатом нелинейного процесса параметрического преобразования частоты. Однако область применения керровских частотных гребенок часто ограничена спектральными диапазонами, характеризующимися аномальной дисперсией групповых скоростей (ДГС), поскольку достижение модуляционной неустойчивости для инициирования гребенки при нормальной ДГС является сложной задачей. В то же время, в видимом и телекоммуникационном диапазонах материальная ДГС микрорезонаторов обычно является нормальной для подавляющего большинства материалов. В области нормальной ДГС когерентные оптические частотные гребенки могут существовать в форме платиконов, диссипативных солитонов с плоскими вершинами, которые могут возбуждаться и стабильно существовать в таких микрорезонаторах при наличии локального возмущения закона дисперсии [6].

В данной работе уделяется особое внимание изучению новых возможностей кремния, как материала для МШГ фотоники. Кремний является многообещающим материалом для создания нелинейных устройств ближнего и среднего инфракрасного диапазона на основе МШГ благодаря его высокому нелинейному показателю преломления,  $n_2 = 4.5 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{Вт}$ , что позволяет наблюдать нелинейные эффекты при значительно меньших уровнях мощности нежели в прочих материалах. Материальная ДГС для кристаллического кремния на длинах волн в окне прозрачности вплоть до 20 мкм является нормальной.

Создание сверхвысокодобротных резонаторов из кристаллического кремния открывает интересные возможности их использования в среднем ИК-диапазоне (а именно 2.3 - 8 мкм), которые могут представлять интерес для многих приложений в науке и технике. В среднем ИК-диапазоне ограничение на достижимую добротность из-за двухфотонного поглощения отсутствует, а доминирующим становится значительно более слабое трехфотонное поглощение, пропорциональное кубу интенсивности. Стоит также отметить, что добротность

кристаллических фторидов, традиционно используемых для изготовления микрорезонаторов, ухудшается в среднем ИК-диапазоне из-за многофононного поглощения, в то время как, многофононное поглощение в кремнии становится фактором, ограничивающим добротность лишь с 8 мкм, что делает кремний практически уникальным материалом для изготовления МШГ резонаторов со сверхвысокими добротностями в среднем ИК-диапазоне. Использование кремниевых микрорезонаторов для генерации широких оптических частотных гребенок с чрезвычайно низким фазовым шумом в среднем ИК-диапазоне может обеспечить новые подходы к молекулярной спектроскопии в «области отпечатков пальцев». Благодаря высокой достижимой добротности микрорезонаторы из кристаллического кремния могут стать основой для нового класса лазерных источников с узкой шириной линии в среднем ИК-диапазоне, основанных на эффекте затягивания [7,8].

Явление затягивания много лет используется в радиофизике и микроволновой электронике для стабилизации автогенераторов и повышения их спектральной чистоты. В течение последних десятилетий затягивание также активно изучалось и применялось в оптике и лазерной физике. Наиболее интересные результаты были продемонстрированы с микрорезонаторами с модами "шепчущей галереи". В настоящее время эффект затягивания лазерных диодов на микрорезонаторы с МШГ является ключевым компонентом различных современных фотонных приложений. Затягивание на МШГ происходит из-за того, что обратное рассеяние Рэлея в оптических микрорезонаторах формирует пассивную частотно-селективную оптическую обратную связь с лазерным диодом, что приводит к значительному подавлению фазового шума лазерного излучения и уменьшению ширины линии. Недавние исследования продемонстрировали пассивную стабилизацию одночастотного или даже многочастотного [8] полупроводникового лазера до субкилогерцового уровня ширины линии в режиме затягивания на высокодобротный МШГ микрорезонатор в различных спектральных диапазонах, от УФ до среднего ИК. Кроме того, было показано, что такие стабилизированные лазерные диоды могут быть использованы в качестве источника накачки для генерации оптических частотных гребенок (ОЧГ) на основе микрорезонаторов [8].

При создании таких устройств на основе микрорезонаторов, работающих в режиме затягивания, может возникнуть сложная проблема точного опреде-

ления параметров опорного микрорезонатора. Его добротность является ключевым параметром, который определяет эффективность затягивания и параметры устройства, поскольку именно она определяет результирующую ширину линии лазерного источника [7] и порог нелинейных эффектов [5]. Существует несколько хорошо известных способов измерения добротности микрорезонатора: измерение ширины на полувысоте лоренцева пика резонансной кривой, метод звона, основанный на регистрации осцилляций пропускания после импульсного возбуждения МШГ и оценке добротности по времени затухания. Однако в режиме затягивания такие методы неприменимы.

**Целью** данной работы является исследование высокодобротных оптических микрорезонаторов для задач современной фотоники, включая создание высокодобротных резонаторов из кремния и эффективных способов связи с ними, выявление особенностей и поиск новых режимов генерации оптических частотных гребенок в резонаторах с нормальной дисперсией групповых скоростей, применение режима затягивания частоты микрорезонаторами в ИК диапазоне и возможности определения их параметров в этом режиме.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать технологию изготовления высокодобротных микрорезонаторов с модами "шепчущей галереи" из кристаллического кремния. Разработать способ эффективного ввода и вывода излучения для таких резонаторов. Определить для них экспериментально достижимую добротность и ограничивающие ее факторы.
2. Исследовать нелинейные эффекты в высокодобротных микрорезонаторах с модами "шепчущей галереи" в области нормальной дисперсии групповых скоростей. Экспериментально проверить возможность генерации оптических частотных гребенок при использовании двухчастотной накачки и режима затягивания. Исследовать взаимодействие мод с ортогональными поляризациями при нормальной дисперсии групповых скоростей.
3. Исследовать особенности режима затягивания частоты лазерного диода высокодобротным микрорезонатором с модами "шепчущей галереи" в ИК диапазоне, выявить факторы, определяющие коэффициент стабилизации частоты, разработать способ измерения собственной доброт-

ности резонатора и идентификации типа возбуждаемой моды в этом режиме.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенная методика обработки резонаторов с модами "шепчущей галереи" из кристаллического кремния с использованием безалмазных полирующих составов позволяет получить добротность свыше  $10^9$  за счет снижения поверхностных потерь.
2. Новый способ возбуждения мод "шепчущей галереи", основанный на использовании полусферического элемента связи из того же материала, что и микрорезонатор, обеспечивает эффективное возбуждение мод "шепчущей галереи".
3. Метод бигармонической накачки обеспечивает генерацию оптических частотных гребенок нового типа в области нормальной дисперсии групповых скоростей, выделяются "мягкий" и "жесткий" режимы генерации.
4. Взаимодействие мод разных поляризаций, может обеспечивать генерацию оптических частотных гребенок в области нормальной дисперсии групповых скоростей.
5. Явление затягивания лазерного диода на микрорезонатор с модами "шепчущей галереи" обеспечивает генерацию керровских частотных гребенок, в том числе и когерентных, в области нормальной дисперсии групповых скоростей. Установлено экспериментально, что спектр керровской гребенки зависит от соотношения между областями свободной дисперсии лазерного диода и резонатора.
6. Предложенная методика, основанная на измерении ширины диапазона затягивания лазера модой микрорезонатора как функции расстояния между резонатором и элементом связи, позволяет определить основные параметры моды "шепчущей галереи", такие как ее добротность, вертикальный индекс, в режиме затягивания частоты лазерного диода на нее.
7. Квадрат коэффициента стабилизации и ширина диапазона затягивания могут регулироваться изменением набега фазы обратной волны, который зависит от расстояния между лазером и резонатором, в пределах

от 200 до 40000 и от 600 до 1200 полуширин линии микрорезонатора соответственно.

### **Научная новизна:**

1. Впервые была экспериментально продемонстрирована добротность в оптических микрорезонаторах с модами "шепчущей галереи" из кристаллического кремния, превышающая миллиард, что на два порядка выше лучших мировых результатов.
2. Впервые был предложен и применен в эксперименте новый метод возбуждения мод "шепчущей галереи" - с помощью полусферического элемента связи, изготовленного из того же материала, что и сам микрорезонатор.
3. Впервые продемонстрированы и исследованы экспериментально оптические частотные гребенки в области нормальной дисперсии групповых скоростей в микрорезонаторах с модами "шепчущей галереи", возбуждаемые за счет взаимодействия семейств мод разных поляризаций, с применением двухчастотной накачки, а также за счет эффекта затягивания лазерного диода на микрорезонатор при кратности области свободной дисперсии лазера и резонатора.
4. Разработана и реализована новая универсальная методика определения основных параметров моды "шепчущей галереи" резонатора (добротности и вертикального индекса моды) и лазера в режиме затягивания лазерного диода на микрорезонатор.
5. Впервые продемонстрирован экспериментально эффект затягивания лазерного диода на моду "шепчущей галереи" микрорезонатора из кристаллического кремния в среднем ИК. Продемонстрирована рекордная добротность  $5 \cdot 10^8$  для полупроводниковых микрорезонаторов в среднем ИК-диапазоне.
6. Впервые продемонстрирована возможность управления коэффициентом стабилизации лазера микрорезонатором путем изменения набега фазы обратной волны. При величине набега фазы обратной волны между полупроводниковым лазером и резонатором близкой к  $2\pi n$  реализуются максимальная ширина затягивания и коэффициент стабилизации частоты, которые для резонатора с добротностью  $4 \cdot 10^8$  на длине волны 1550 нм составили 1.2 ГГц и  $4 \cdot 10^3$ , соответственно.

**Научная и практическая значимость.** Достигнутая рекордная добротность превышающая  $2 \cdot 10^9$  МШГ резонаторов из кристаллического кремния коренным образом меняет представление о том, какие материалы лучше всего подходят для изготовления микрорезонаторов ИК диапазона. Данный результат является существенным вкладом в понимание механизмов оптических потерь в кремнии, в частности роли поверхностного рассеяния и поглощения. Предложенный способ возбуждения мод "шепчущей галереи" – полусферический элемент связи из того же материала, что и микрорезонатор, решает общую проблему реализации эффективной связи с резонаторами из материалов с большим показателем преломления. Теоретические модели генерации частотных гребенок в резонаторах с нормальной дисперсией групповых скоростей были предложены ранее, однако в реальных резонаторах могут проявляться эффекты, которые сложно учесть, например, тепловая нелинейность и нелинейные потери.

Экспериментально продемонстрированная генерация частотной гребенки в резонаторе из  $MgF_2$  на длине волны 1064 нм подтвердила основные положения моделей, позволила выявить особенности получаемых гребенок, а также обнаружить совершенно новый способ возбуждения за счет взаимодействия мод с различной поляризацией. Это является принципиально важным результатом для разработки компактных источников частотной гребенки видимого и ближнего ИК диапазонов, а также для построения полной теории, описывающей динамику нелинейных процессов в микрорезонаторах с кубической нелинейностью.

Одним из наиболее эффективных и в тоже время простых в реализации способов привязки частоты лазера к собственной частоте оптического микрорезонатора является использование эффекта затягивания. Демонстрация возможности затягивания полупроводниковых лазеров кремниевым резонатором с рекордной добротностью на длине волны 2.6 мкм подтверждает применимость данного способа для стабилизации лазеров среднего ИК диапазона такими резонаторами и служит основанием для продолжения исследований на больших длинах волн, вплоть до терагерцового диапазона. Предложенный способ определения добротности и типа моды МШГ резонатора непосредственно в режиме затягивания является универсальным, применим для любых резонаторов с призмной связью и, в некоторых случаях, оказывается единственным, реали-

зация которого не требует дополнительного оборудования либо разрушения конструкции, таким образом, его практическую значимость трудно переоценить.

Полученные результаты будут способствовать повышению эффективности имеющихся, а также созданию новых востребованных устройств, работающих на принципах фотоники и радиофотоники.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются высокодобротные кристаллические микрорезонаторы с модами типа "шепчущей галереи". Предметом исследования являются линейные и нелинейные эффекты в высокодобротных микрорезонаторах при накачке лазерным источником в режиме непрерывного излучения, в частности эффект затягивания частоты лазерного диода на собственную частоту высокодобротного микрорезонатора с модами типа "шепчущей галереи", а также генерация керровских оптических частотных гребенок в таких микрорезонаторах.

**Методология и методы исследования.** В работе использовались следующие методы: метод гетеродинамирования для определения мгновенной ширины линии лазерных источников, метод квадратурного анализа спектральной плотности для характеристики уровня фазовых шумов лазерного излучения, метод спектрограмм для визуализации и оценки перестроечных кривых затянутого лазера, метод звона для определения добротности микрорезонаторов, метод определения добротности моды шепчущей галереи и ее вертикального индекса непосредственно в режиме затягивания (разработан и опубликован автором), а также общепринятые методы теоретической и экспериментальной физики.

**Степень достоверности.** Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью постановки задач, использованием обоснованных экспериментальных и численных методов, и подтверждается публикациями в рецензируемых изданиях.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на ряде престижных всероссийских и международных конференций: XVI Всероссийская школа-семинар "Физика и применение микроволн" имени профессора А.П. Сухорукова "Волны-2017" (Красновидово, Московская область, Россия, 2017), XI Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии ФЭКС - 2017 (Светлогорск, Россия, 2017), XVI Всероссийская школа-семинар "Волновые явления в неоднородных средах" имени профессора А.П.

Сухорукова "Волны-2018" (Красновидово, Московская область, Россия, 2018), 18th International Conference on Laser Optics "ICLO 2018" (Санкт-Петербург, Россия, 2018), Advanced Laser Technologies ALT'18, (Таррагона, Испания, 2018), VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике, НИ-ЯУ МИФИ (Москва, Россия, 2019), SPIE Photonics West, (San Francisco, США, 2019), XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова "Волны-2019" (Красновидово, Московская область, Россия, 2019), 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe – European Quantum Electronics Conference (Мюнхен, Германия, 2019), OSA Advanced Photonics Congress, OSA Virtual Event (США, 2020), Advanced Solid State Lasers (ASSL) 2020 (Washington, D.C., США, 2020).

**Личный вклад.** Все изложенные в работе результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 21 печатном издании, из которых 7 - статьи, индексируемые в базах SCOPUS, Web of Science.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 135 страниц с 45 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 149 наименований.

## Содержание работы

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. В **первой главе** описывается исследование МШГ микрорезонаторов из высокочистого кристаллического кремния. Экспериментально демонстрируется рекордная измеренная добротность в оптических микрорезонаторах из кристаллического кремния миллиметрового диаметра на длине волны 1550 нм, которая составила  $1.2 \cdot 10^9$ . Выявлено, что использование метода полировки, предотвращающего избыточное поглощение на поверхности, играет решающую роль. Было установлено, что ключевым фактором, ограничивающим добротность предыдущих попыток, было химическое взаимодействие между материалом резонатора и полировальной суспензией. Возбуждение мод "шепчущей галереи" осуществлялось с помощью оригинального полусфериче-

ского элемента связи, позволившего добиться эффективности связи свыше 35%. Кроме того, проведенные исследования позволяют рассматривать микрорезонаторы как уникальные объекты для измерения низких оптических потерь в приповерхностном слое.

**В первом параграфе** формулируются предпосылки для достижения высоких добротностей в кремнии, исходя из доступности высокочистых материалов. Также, формулируются основные преимущества кремниевых МШГ резонаторов по отношению к микрорезонаторам из других наиболее распространенных материалов, а именно, высокий коэффициент керровской нелинейности, высокие достижимые добротности в среднем ИК, ограниченные многофононным поглощением для длин волн свыше 8 мкм, в то время как для фторидов это ограничение становится доминирующим для длин волн свыше 4.5 мкм.

**Во втором параграфе** анализируются механизмы потерь в кремниевых микрорезонаторах. Рассчитывается достижимая добротность на основе величины линейных объемных потерь в кремнии по удельному сопротивлению:  $\alpha = (0.0454 [\text{Ом}])/\rho$ , что для материала с наибольшим удельным сопротивлением 37 кОм·см имеет величину  $\alpha \simeq 1.2 \text{ ppm/см}$ . Соответствующая добротность может быть получена по формуле:

$$Q_{\text{b.a}} = \frac{2\pi n_r}{\alpha \lambda} \simeq 1 \cdot 10^{11}, \quad (1)$$

где  $n_r = 3.48$  - показатель преломления материала резонатора, на длине волны  $\lambda = 1550 \text{ нм}$ .

Стоит отметить, что кремний является полупроводниковым материалом, а значит в нем может наблюдаться двухфотонное поглощение и последующее прассеяние на свободных носителях, что может ограничивать измеренную добротность.

**В третьем параграфе** описывается процесс обработки поверхности микрорезонатора, позволяющий избежать избыточного поглощения на поверхности. Показано, что этот результат обусловлен финальной полировкой коллоидным раствором диоксида кремния, который удаляет слой карбида кремния и позволяет получить малые поверхностные потери.

**В четвертом параграфе** описывается новый метод возбуждения мод "шепчущей галереи" - с помощью полусферического элемента из того же материала, что и микрорезонатор. Благодаря полусферической форме, луч сфо-

кусированный в центр внешней грани полусферы не испытывает преломления, что значительно упрощает юстировку оптической схемы, а также позволяет возбуждать МШГ при углах падения на основание призмы близких к  $\pi/2$ .

В пятом и шестом параграфах описывается экспериментальная установка и методика проведения эксперимента.

В седьмом параграфе описываются особенности МШГ в кремнии, связанные с проявлением тепловой нелинейности и двухфотонного поглощения, см. рис. 1.

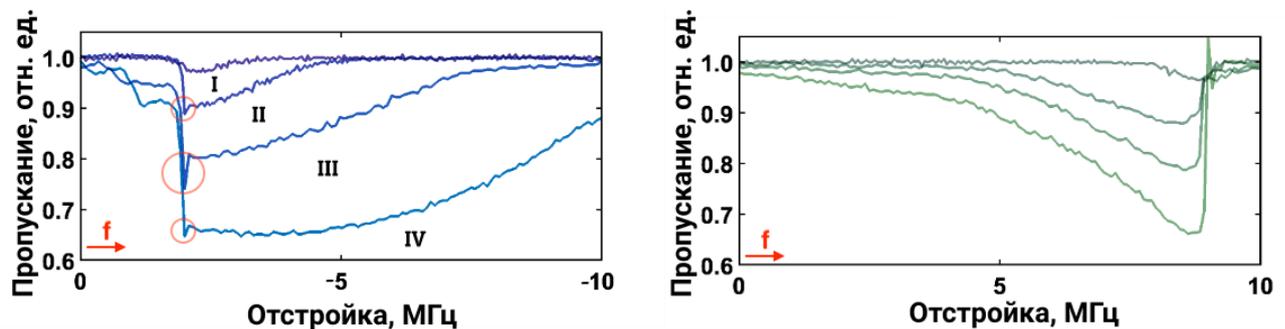


Рисунок 1 — Нелинейные профили мод резонатора при уменьшении частоты (слева) и увеличении (справа) для разных уровней связи (I - минимум, IV - максимум).

В восьмом параграфе описывается методика измерения добротности с помощью метода звона, позволяющая минимизировать нелинейные эффекты. Приведены экспериментальные результаты для добротности  $1.2 \cdot 10^9$ , см. рис. 2. Приводятся оценки глубины залегания моды "шепчущей галереи".

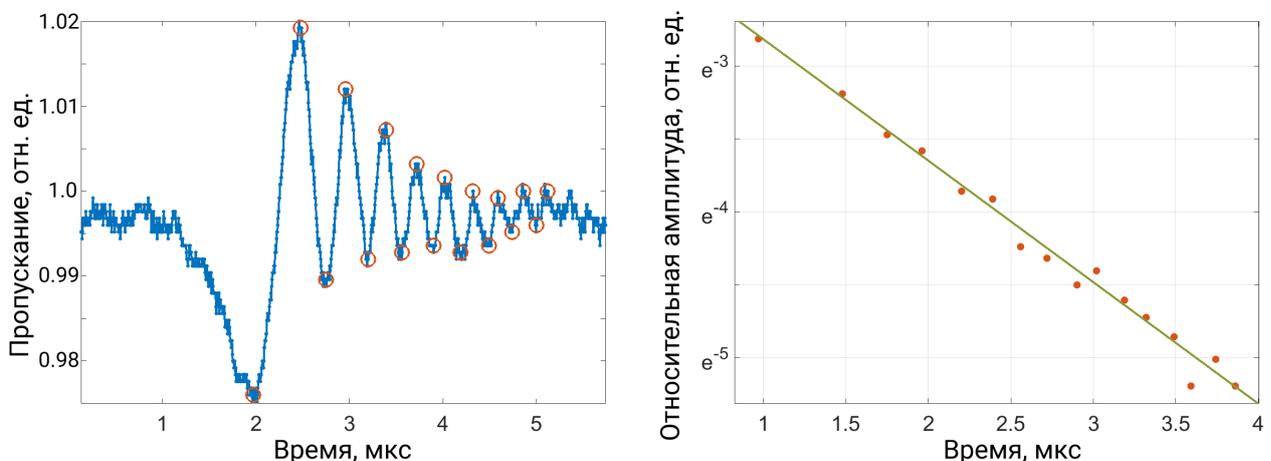


Рисунок 2 — Затухание колебаний в высокодобротной моде с  $Q = \pi c t / \lambda = (1.2 \pm 0.1) \times 10^9$ . Слева - осцилляции пропускания, справа - экспоненциальная интерполяция.

В **девятом параграфе** приводятся величины измеренных добротностей в микрорезонаторах из кристаллического кремния с различным удельным сопротивлением и их сравнение с величинами, рассчитанными из объемных потерь, которые были получены методом измерения градиента показателя преломления.

В **десятом параграфе** сформулированы выводы по результатам, изложенным в главе.

Во **второй главе** описываются результаты исследования генерации оптических частотных гребенок в МШГ микрорезонаторах в области нормальной дисперсии групповых скоростей. Было реализовано три различных метода, а именно, локальное изменение закона дисперсии, вызванное взаимодействием мод, использование двойной накачки и использование эффекта затягивания. Были выявлены новые режимы генерации ОЧГ, связанные с взаимодействием семейств мод различных поляризаций. В результате применения метода двойной накачки экспериментально были продемонстрированы два режима генерации ОЧГ нового типа - мягкий и жесткий. Было показано, что затягивание приводит к генерации ОЧГ с узким сигналом биений, а также продемонстрировано, что подавленные продольные моды лазерного диода оказывают влияние на спектр ОЧГ.

Во **втором параграфе** описана экспериментальная установка и условия проведения эксперимента.

В **третьем параграфе** сформулированы результаты эксперимента при монохроматической накачке. В главе используются микрорезонаторы из фторида магния, материальная дисперсия для этого материала является нормальной для длин волн, используемых в экспериментах. Приводятся результаты измерения добротности методом звона. Время звона составило 0.75 мкс, добротность в таком случае равна  $Q \approx 1.25 \cdot 10^9$ . Так как в приведенном случае связь являлась критической, то собственная добротность микрорезонатора может быть оценена как  $Q_{\text{int}} \approx 2.5 \cdot 10^9$ .

При такой добротности в исследуемом микрорезонаторе наблюдались различные неустойчивые режимы, при которых происходила генерация оптических частотных гребенок. Наиболее выраженная неустойчивость не соответствовала оптимальной поляризации для большинства высокодобротных мод, на которых была получена связь свыше 70%, поляризацию накачки необходимо было по-

вернуть для достижения наибольшей области неустойчивости. Важен факт того, что поляризацию необходимо было существенно подстраивать, что говорит о том, что неустойчивость и процесс генерации частотных гребенок являются следствием взаимодействия мод различных поляризаций. При этом можно настроиться на моды разных поляризаций независимо, варьируя только лишь поляризацию.

Проявление подобных неустойчивых режимов указывает на возможность генерации оптических частотных гребенок. Для возбуждения ОЧГ осуществляется настройка в область генерации ОЧГ в режиме самостабилизации частоты, вызванной тепловой нелинейностью, при выключенной перестройке частоты. Были получены гребенки с частотным интервалом между линиями равным 1 и 2 ОСД микрорезонатора, спектры ОЧГ представлены на рисунке (3). Наблюдалось до 24 линий в первом случае и до 39 линий во втором, при ширине гребенки до 3 нм. Ширина спектра не зависит от частотного интервала между линиями.

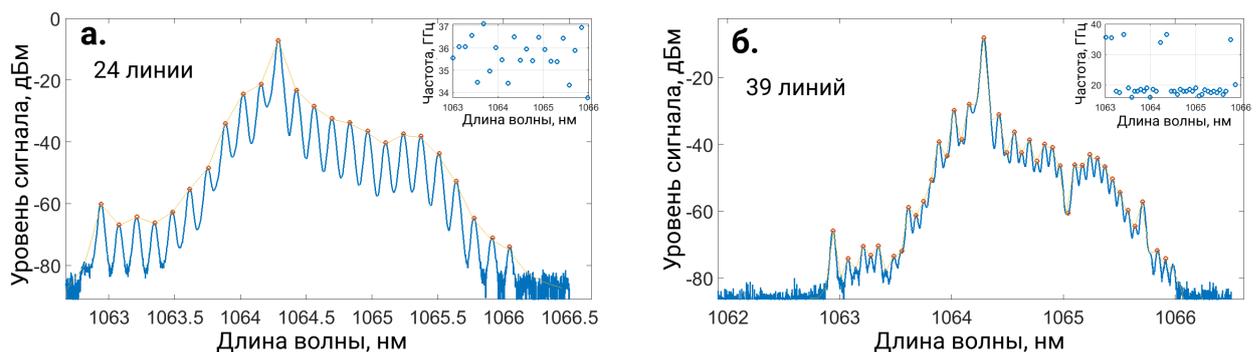


Рисунок 3 — Оптические частотные гребенки, вызванные взаимодействием мод различных семейств. На вставках - величина частотного интервала между соседними линиями.

В четвертом параграфе сформулированы результаты, полученные с применением метода бигармонической накачки. В отсутствие второй накачки на частоте, отстроенной от первой на частоту ОСД микрорезонатора, наблюдается нелинейная мода без неустойчивостей и, следовательно, отсутствует генерация частотной гребенки.

Наблюдалось два различных режима генерации ОЧГ, которые условно можно назвать "жестким" и "мягким". "Жесткий" режим генерации ОЧГ с применением двойной накачки заключается в том, что вторая накачка, обеспечив переход в режим генерации, не достижимый адиабатически, затем не участвует

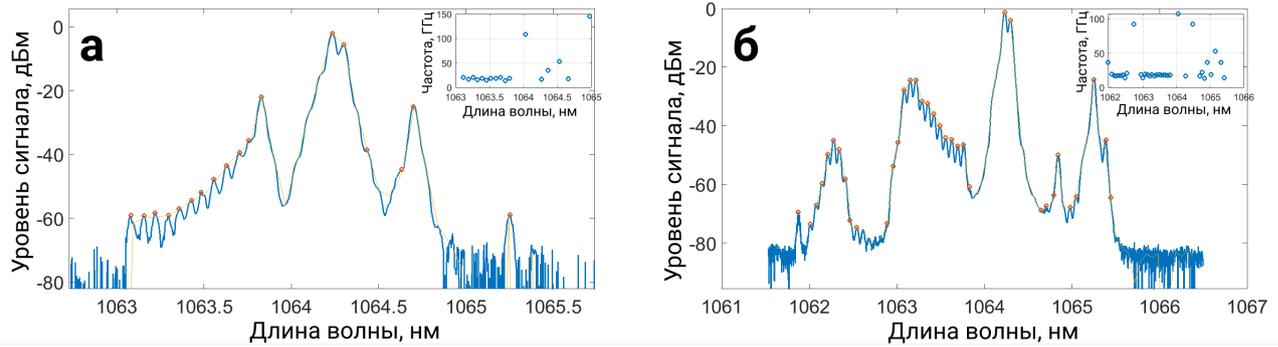


Рисунок 4 — На рисунках изображены спектры ОЧГ при ”жестком” режиме генерации при увеличении величины отстройки накачки от холодного МШГ резонанса.

в процессе и может быть отключена. То есть вторая накачка создает условия, при которых начинается генерация ОЧГ, см. рис. (4).

Мягкий режим генерации ОЧГ с применением двойной накачки заключается в том, что вторая накачка непосредственно обеспечивает генерацию ОЧГ, участвует в четырехволновом смешении. Важным отличием от ”жесткого” режима является то, что в данном режиме гребенка пропадает после отключения второй накачки. Генерация осуществима только при точном совпадении отстройки частоты второй накачки от первой на величину ОСД резонатора, см. рис. (5).

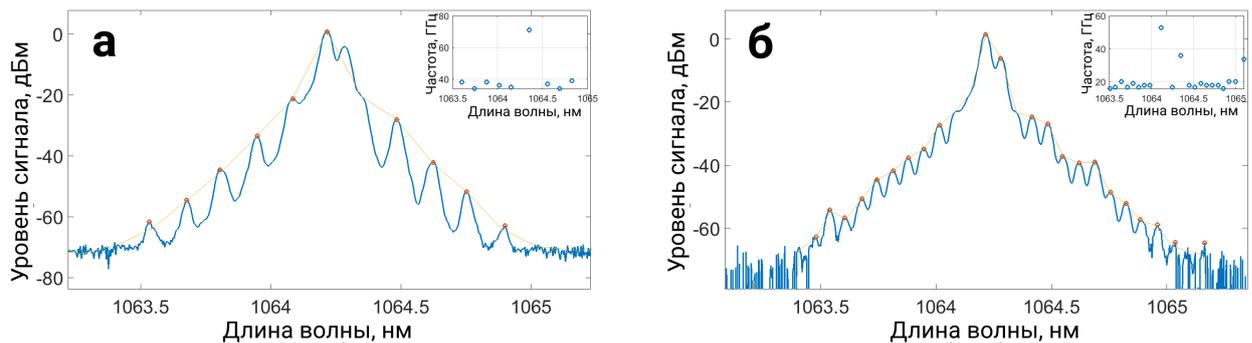


Рисунок 5 — Спектры ОЧГ, полученные в рамках эксперимента с двойной накачкой при ”мягком” режиме возбуждения.

В пятом параграфе сформулированы результаты исследования генерации гребенок при затягивании частоты лазерного диода на частоту микрорезонатора. Для реализации эксперимента генерации ОЧГ в режиме затягивания был выбран одночастотный лазерный источник без изолятора мощностью до 70 мВт на длине волны 780 нм.

В рамках эксперимента были исследованы оптические спектры во всем диапазоне сканирования тока питания лазерного диода. Было отмечено, что, за исключением редких случаев, когда интервал между линиями гребенки был равен 1 ОСД микрорезонатора см. рис. (6), этот интервал оказывался кратен четному числу ОСД микрорезонатора (2, 4, 6 и 8), при отсутствии линий, отстоящих от накачки на нечетное число ОСД.

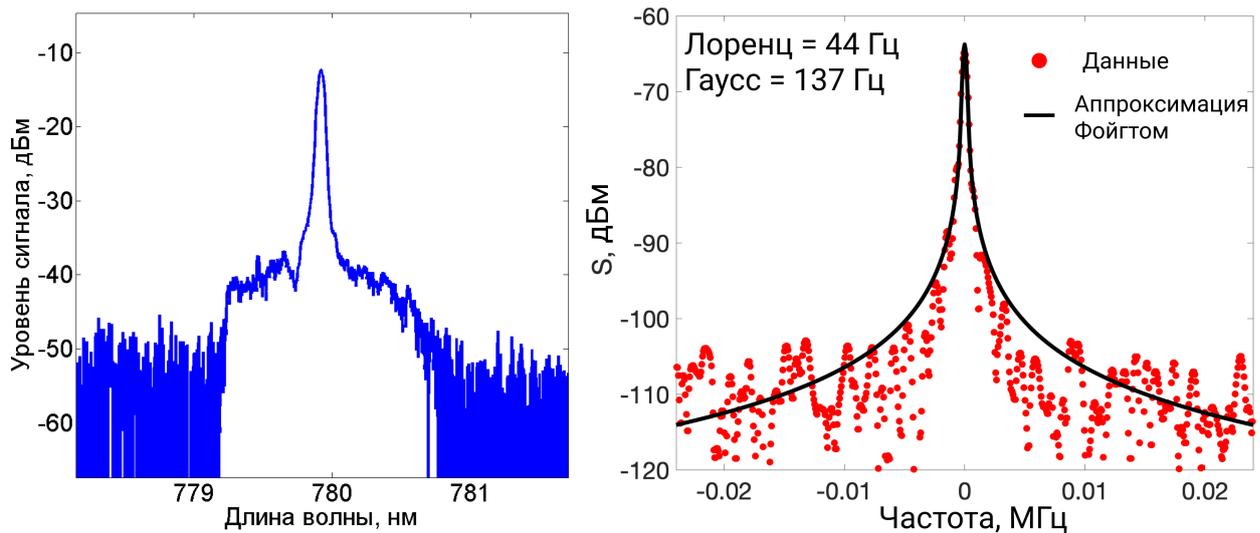


Рисунок 6 — Слева: огибающая спектра когерентной оптической частотной гребенки в режиме затягивания с частотным расстоянием между линиями, равным 1 ОСД микрорезонатора. Справа: спектр сигнала биений между линиями; из значений частоты вычтена величина ОСД резонатора 21.98 ГГц. При аппроксимации распределением Фойгта лоренцева компонента ширины линии сигнала биений составила 44 Гц, а гауссова 137 Гц.

Расстояние между модами диода составляет  $\approx 45$  ГГц, что примерно соответствует 2 ОСД микрорезонатора.

Для проверки универсальности полученных результатов резонатор диаметром 3 мм был заменен на другой высокочастотный резонатор из фторида магния диаметром 4 мм. Для такого резонатора также была характерна генерация ОЧГ, причем частота между линиями кратная ОСД лазера также оставалась выделенной несмотря на то, что 45 ГГц не кратно ОСД резонатора. Этот факт доказывает непосредственное влияние подавленных продольных мод лазерного диода на спектр ОЧГ.

ОСД микрорезонатора составляет 17.5 ГГц для диаметра 4 мм. Наименьшее общее кратное 17.5 и 45 равно 90, что соответствует 2 ОСД лазера и 5 ОСД

микрорезонатора. Было получено экспериментальное подтверждение выделенности именно линий, разнесенных на 90 ГГц. Этот факт показывает влияние подавленной продольных мод лазерного диода на генерацию ОЧГ при затягивании.

Таким образом, в рамках экспериментов с лазерным диодом 780 нм было продемонстрировано, что затягивание приводит к генерации оптических частотных гребенок. Продемонстрированы экспериментально когерентные ОЧГ в режиме затягивания. Было экспериментально установлено, что лазерный диод оказывает влияние на возбуждение оптических частотных гребенок и может определять спектр генерации.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена экспериментальному исследованию режима затягивания. В первом параграфе предложена оригинальная методика, опирающаяся на первоосновы теории эффекта затягивания, которая позволяет определять основные параметры микрорезонатора (добротность, вертикальный индекс МШГ), а также параметры лазерного диода, непосредственно в режиме затягивания. Было продемонстрировано, что этот метод может использоваться в различных спектральных диапазонах, в том числе, в случаях, когда обычные методы характеристики микрорезонатора неприменимы, например, в среднем ИК диапазоне. Также впервые было реализовано затягивание лазерного диода 2639 нм на кремниевый микрорезонатор с модами "шепчущей галереи". С помощью предложенного метода была измерена его добротность, которая составила  $5 \cdot 10^8$ .

Затягивание частоты генерации лазерного диода на собственную частоту микрорезонатора обеспечивает существенное сужение линии генерации и стабилизацию частоты лазера, однако деформирует форму резонансной кривой в прошедшем излучении и делает невозможным применение обычных методов измерения добротности. В данной работе предложен метод, основанный на измерении зависимости ширины диапазона затягивания от зазора между резонатором и элементом связи, которая позволяет определить собственную добротность МШГ микрорезонатора и ее вертикальный индекс  $p$ . Согласно [7], в случае нулевой фазы затягивания справедливы следующие выражения для полной ширины диапазона затягивания  $\delta\omega_{\text{lock}}$  и для ширины перекрытия мод  $\delta\omega_{\text{in}}$ , которая является перекрытием диапазонов затягивания при прямом и обратном

сканировании частоты:

$$\delta\omega_{\text{lock}} \approx 3\sqrt{3}\gamma \frac{\kappa_{mc}}{\kappa_m^2} \bar{\kappa}_{do} + \frac{\sqrt{3}}{3} \kappa_m, \quad (2)$$

$$\delta\omega_{\text{in}} \approx 8\sqrt[4]{\frac{\kappa_{mc}\kappa_m\gamma\bar{\kappa}_{do}}{27}}. \quad (3)$$

Здесь  $\gamma$  - коэффициент связи прямой и обратной волны,  $\bar{\kappa}_{do}$  - эффективный коэффициент связи выходного зеркала лазера, а  $\kappa_m = \kappa_{mc} + \kappa_{mi}$  - ширина линии микрорезонатора, где  $\kappa_{mi}$  определяется внутренними, собственными потерями в микрорезонаторе, а  $\kappa_{mc}$  - потерями на связь.

Анализируя производную (2) по  $\kappa_{mc}$  микрорезонатора, легко видеть, что максимум ширины затягивания имеет место при критической связи  $\kappa_{mi} = \kappa_{mc}$ . Зная  $\kappa_{mc}$  при максимальном диапазоне затягивания, можно также узнать  $\kappa_{mi}$ . В то же время  $\kappa_{mc}$  можно оценить, зная значение зазора  $d$  между микрорезонатором и элементом связи [9]:

$$\kappa_{mc} \approx \frac{\omega}{2} \left( \frac{n^2 - 1}{n} ak \right)^{-3/2} \exp(-2kd\sqrt{n^2 - 1}) \times \begin{cases} 1/\sqrt{\frac{\pi}{1+\sqrt{n^2-1}}}, p = 0 \\ 1/(\sqrt{2}\pi\sqrt{p}), p > 0 \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $\omega$  - частота накачки,  $a$  - радиус микрорезонатора,  $k = \omega/c$  - волновое число в вакууме,  $p$  - вертикальный индекс моды. Для определения добротности МШГ необходимо измерить зависимость диапазона затягивания от зазора между элементом связи и микрорезонатором в режиме затягивания. Ширина в точке касания однозначно определяет индекс  $p$ . Положение максимума ширины затягивания определяет добротность микрорезонатора.

Чтобы проверить предложенный метод определения добротности, были выполнены измерения зависимости ширины диапазона затягивания от зазора между резонатором и элементом связи (с контролем ширины линии резонатора при касании для определения вертикального индекса моды) для микрорезонатора из  $\text{MgF}_2$  на длине волны 1550 нм, после чего рассчитанная добротность сравнивалась с результатом, полученным с помощью метода звона, результаты представлены на рисунке (7).

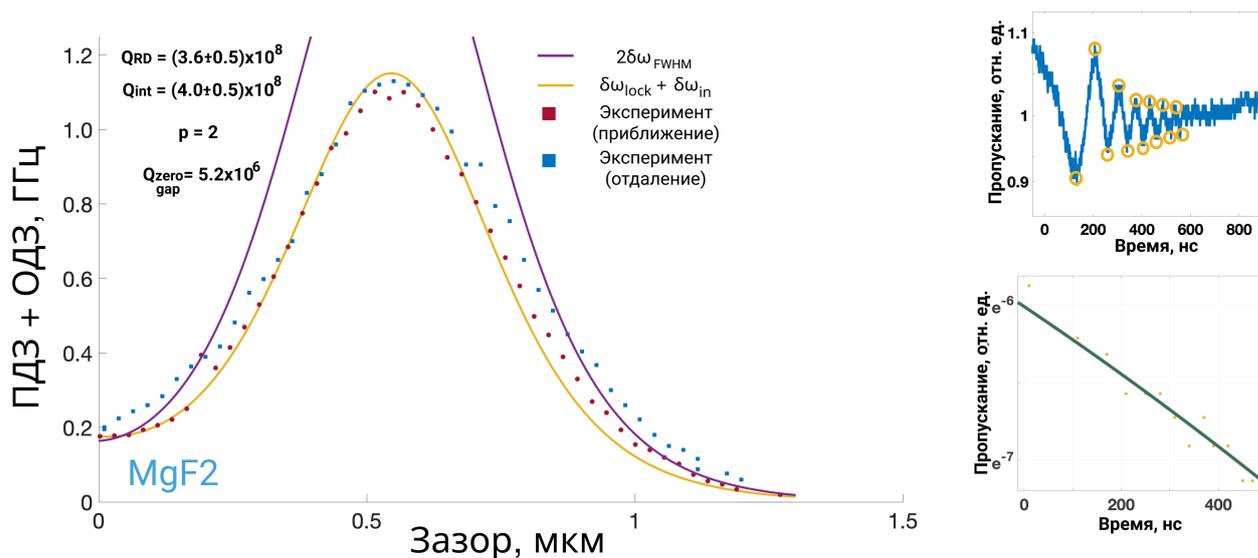


Рисунок 7 — Зависимость ширины диапазона затыгивания (ПДЗ+ОДЗ) от зазора для MgF<sub>2</sub> микрорезонатора. Точки - экспериментальные данные, желтая сплошная линия - кривая, рассчитанная из (2) и (3). Зависимость пропускания от частоты и интерполяция для метода звона представлены на врезках.

Разработанная методика была применена для определения добротности кремниевого микрорезонатора на длине волны 2639 нм при накачке лазерным диодом в режиме затыгивания. Максимальная величина добротности МШГ микрорезонатора составила  $(5.0 \pm 0.7) \cdot 10^8$ , вертикальный индекс моды  $p = 1$ . Общий диапазон затыгивания превышал 0.6 ГГц, что для  $Q_{int} = (5.0 \pm 0.7) \cdot 10^8$  соответствует коэффициенту стабилизации  $K = \frac{16\delta\omega_{lock}}{3\sqrt{3}\kappa_m} = 4200$ .

Во **втором параграфе** третьей главы исследуются особенности режима затыгивания от фазы затыгивания, определяемой набегом фазы обратной волны при распространении от микрорезонатора к лазеру и обратно, рассматривается возможность адаптации параметров схемы затыгивания лазерного диода для различных применений. Исследуется влияние фазы затыгивания на спектральные характеристики результирующего излучения, а именно зависимость коэффициента стабилизации, ширины диапазона затыгивания, частоты лазера. Экспериментально демонстрируется возможность перестройки частоты затыгнутого лазера двумя способами - путем варьирования фазы затыгивания и с помощью изменения тока накачки в рамках диапазона затыгивания. Второй способ также позволяет получать линейную частотную модуляцию в режиме затыгивания, которая может быть использована для измерения расстояния.

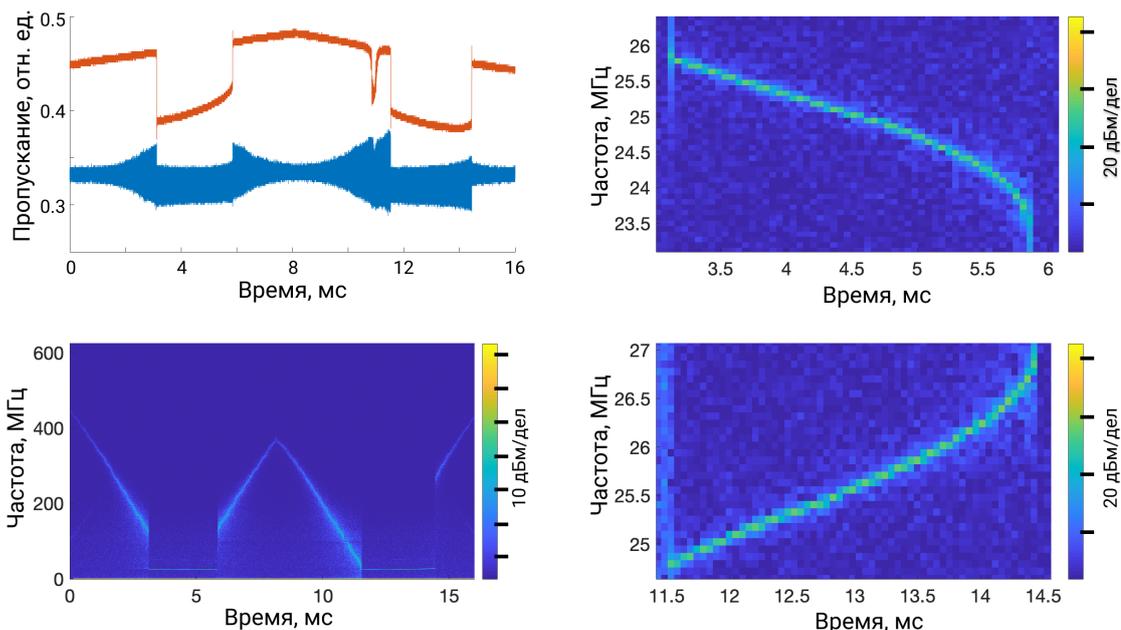


Рисунок 8 — Спектрограмма для фазы затягивания близкой к нулю.

Оптическое излучение затянутого лазерного диода исследовалось с помощью построения спектрограмм. Излучение лазера, смешанное с гетеродином, оцифровывалось с частотой дискретизации  $1.25 \cdot 10^9$  отсчетов в секунду. Затем от полученного сигнала вычислялось оконное преобразование Фурье. Полученные спектрограммы, пример представлен на рисунке (8), несут информацию о частоте затянутого лазера, коэффициенте стабилизации, ширине диапазона затягивания. Было проведено исследование зависимости величины коэффициента стабилизации от фазы затягивания и было показано хорошее соответствие с теоретическими оценками. Кроме того, было показано, что частота лазерного излучения меняется при изменении фазы затягивания. Были проведены измерения фазового шума затянутого лазерного диода, которые показали минимальную ширину линии менее 200 Гц на отстройках 10-500 кГц, показано, что такой уровень шумов связан с шумами гетеродина. Также были проведены эксперименты по модуляции тока лазерного диода в режиме затягивания. Было показана частотная модуляция с линейными участками размахом 10-30 МГц, что составляет десятки  $\kappa_{mi}$ , с частотами модуляции от десятков герц до 200 кГц.

## Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Экспериментально продемонстрирована добротность в оптических МШГ микрорезонаторах из кристаллического кремния, превышающая  $10^9$ , что на два порядка выше лучших мировых результатов.
2. Предложен и реализован новый метод возбуждения мод "шепчущей галереи" - с помощью полусферического элемента связи, изготовленного из того же материала, что и сам микрорезонатор.
3. Экспериментально продемонстрированы и исследованы оптические частотные гребенки в области нормальной дисперсии групповых скоростей в микрорезонаторах с модами "шепчущей галереи", возбуждаемые за счет взаимодействия семейств мод разных поляризаций.
4. Выявлены новые режимы генерации керровских гребенок в МШГ резонаторах при нормальной дисперсии групповых скоростей при двухчастотной накачке.
5. Показана и детально изучена генерация оптических частотных гребенок в области нормальной дисперсии групповых скоростей при накачке лазерным диодом в режиме затягивания.
6. Разработана, экспериментально подтверждена и применена новая универсальная методика определения основных параметров микрорезонаторов с модами шепчущей галереи в режиме затягивания лазерного диода на микрорезонатор.
7. Продемонстрирован экспериментально эффект затягивания лазерного диода на микрорезонатор с модами "шепчущей галереи" из кристаллического кремния на длине волны 2639 нм. Измеренный коэффициент стабилизации частоты превысил 4000.
8. Исследована зависимость коэффициента стабилизации и ширины линии затянутого лазера в зависимости от набега фазы обратной волны. Показана возможность управления коэффициентом стабилизации путем изменения расстояния между лазером и резонатором.

**Список статей, индексируемых в базах данных Scopus и WoS, в которых содержатся основные результаты диссертации**

1. Shitikov A.E., Bilenko I.A., Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Markosyan A., Gorodetsky M.L. Billion Q-factor in silicon WGM resonators//Optica. 2018. Vol. 5. No. 12. P. 1525-1528. Impact factor WoS 11.104.
2. Shitikov A.E., Benderov O.V., Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Rodin A.V., Bilenko I.A. Microresonator and Laser Parameter Definition via Self-Injection Locking //Physical Review Applied. 2020. Vol. 14. No. 6. P. 064047. Impact factor WoS 4.985.
3. Raja A.S., Voloshin A.S., Guo H., Agafonova S.E., Liu J., Gorodnitskiy A.S., Karpov M., Pavlov N.G., Lucas E., Galiev R.R., Shitikov A.E., Jost J.D., Gorodetsky M.L., Kippenberg T.J. Electrically pumped photonic integrated soliton microcomb//Nature communications. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 1-8. Impact factor WoS 14.919.
4. Lobanov V.E., Kondratiev N.M., Shitikov A.E., Galiev R.R., Bilenko I.A. Generation and dynamics of solitonic pulses due to pump amplitude modulation at normal group-velocity dispersion//Physical Review A. 2019. Vol. 100. No. 1. P. 013807. Impact factor WoS 3.989.
5. Cherenkov A.V., Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Shitikov A.E., Skryabin D.V., Gorodetsky M.L. Raman-Kerr frequency combs in microresonators with normal dispersion// Optics Express. 2017. Vol. 25. No. 25. P. 31148. Impact factor WoS 3.894.
6. Lobanov V.E., Kondratiev N.M., Shitikov A.E., Bilenko I.A. Two-color flat-top solitonic pulses in  $\chi^{(2)}$  optical microresonators via second-harmonic generation// Physical Review A. 2020. Vol. 101. No. 1. P. 013831. Impact factor WoS 3.989.
7. Lobanov V.E., Shitikov A.E., Galiev R.R., Min'kov K.N., Kondratiev N.M. Generation and properties of dissipative Kerr solitons and platicons in optical microresonators with backscattering// Optics Express. 2020. Vol. 28. No. 24. P. 36544. Impact factor WoS 3.894.

**Список публикаций, индексируемых в базах данных Scopus или WoS или РИНЦ, в которых содержатся основные результаты диссертации**

1. Bilenko I.A., Shitikov A.E., Lobanov V.E., Kondratiev N.M., Voloshin A.S., Gorodetsky M.L. Experimental observation of above billion quality factor in silicon crystalline optical whispering gallery mode resonators//Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXI. – International Society for Optics and Photonics. 2019. Vol. 10904, P. 1090402.
2. Shitikov A.E., Nesterov N.O., Terentiev R.V., Lobanov V.E., Bilenko I.A., Gorodetsky M.L. Investigation of Kerr frequency combs generation methods in normal GVD regime//2018 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE. 2018. P. 298-298.
3. Shitikov A.E., Lobanov V.E., Pavlov N.G., Voloshin A.S., Bilenko I.A., Gorodetsky M.L. Nonlinear properties of high-Q optical microresonators in normal dispersion range//EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences. 2017. Vol. 161, P. 02025.
4. Shitikov A.E., Tebeneva T., Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Benderov O.V., Rodin A.V., Bilenko I.A. Self-injection locking of a laser diode to a high-Q silicon WGM microresonator//EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences. 2019. Vol. 220, P. 03027.
5. Shitikov A.E., Benderov O.V., Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Bilenko I.A. Characterization of Silicon Whispering Gallery Mode Resonator Using Self-Injection Locking Regime //2020 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE. 2020. P. 1-1.
6. Shitikov A.E., Benderov O.V., Lobanov V.E., Kondratiev N.M., Bilenko I.A. Laser linewidth narrowing via self-injection locking to a silicon microresonator in mid-IR //Advanced Solid State Lasers. – Optical Society of America. 2020. Vol. JTh2A, P. 23.
7. Shitikov A.E., Benderov O.V., Lobanov V.E., Kondratiev N.M., Bilenko I.A. High-Q silicon microresonator for self-injection locking in mid-IR band: development and characterization//Novel Optical Materials and Applications. – Optical Society of America. 2020. Vol. NoM4G, P. 3.

8. Shitikov A.E., Kondratiev N.M., Benderov O.V., Lobanov V.E., Bilenko I.A. Mid-IR DFB Laser Stabilization and Characterization with Silicon Microresonator //2020 IEEE Photonics Conference (IPC). – IEEE. 2020. P. 1-2.
9. Shitikov A. E. et al. Fabrication and Characterization of High-Quality Factor Silicon WGM Microresonators //The European Conference on Lasers and Electro-Optics. – Optical Society of America, 2019.
10. Шитиков А. Е. и др. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ВЫСОКОДОБРОТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ В ОБЛАСТИ НОРМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ ГРУППОВЫХ СКОРОСТЕЙ //XI Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС-2017). – 2017. – С. 142-143.
11. Шитиков А.Е. и др. Исследование методов генерации керровских частотных гребенок в оптических микрорезонаторах в области нормальной дисперсии групповых скоростей //в сборнике Труды школы-семинара «Волны-2018». Когерентная и нелинейная оптика. - 2018. - С. 86-87.
12. Биленко И.А., Нестеров Н.О., Шитиков А.Е., Городецкий М.Л. Стабилизация частот оптической гребёнки, генерируемой в микрорезонаторах, с помощью атомных переходов // Труды школы-семинара «Волны-2018». Когерентная и нелинейная оптика. - 2018. - с. 12-13.
13. Шитиков А.Е. и др. Стабилизация керровской оптической частотной гребенки с помощью привязки к атомному переходу // Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики - 2018». 2018. - с. 142-143.
14. Шитиков А.Е., Павлов Н.Г., Биленко И.А., Городецкий М.Л. Исследование нелинейных свойств высокодобротных оптических микрорезонаторов в области нормальной дисперсии // Сборник трудов XVI Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова («Волны-2017»), серия Секция 6. Радиофотоника. - 2017. - с. 10-11.

## Список литературы

1. Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S. Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes // *Physics Letters A*. 1989. Vol. 137. No. 7-8. P. 393.
2. Gorodetsky M.L. *Optical Microresonators with Giant Quality-factor* // Fizmatlit, Moscow, 2011.
3. Ilchenko V.S., Matsko A.B. Optical resonators with whispering gallery modes-part II: applications // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum electronics*. 2006. Vol. 12. No. 1. P. 15.
4. Chai Yeh. *Applied Photonics* // Elsevier, 2012.
5. Kippenberg T.J., Gaeta A., Lipson M., Gorodetsky M.L. Dissipative Kerr Solitons in Optical Microresonators // *Science*. 2018. Vol. 361. No. 6402. P. eaan8083.6.
6. Lobanov V.E., Lihachev G., Kippenberg T.J., Gorodetsky M.L. Frequency combs and platons in optical microresonators with normal GVD // *Optics express*. 2015. Vol. 23. No. 6. P. 7713.
7. Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Cherenkov A.V. et al. Self-injection locking of a laser diode to a high-Q WGM microresonator // *Opt. Express*. 2017. Vol. 25. No. 23. P. 28167.
8. Pavlov N.G., Koptyaev S., Lihachev G.V. et al. Narrow-linewidth lasing and soliton Kerr microcombs with ordinary laser diodes // *Nature Photonics*. 2018. Vol. 12. No. 11. P. 694.
9. Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S. High-Q optical whispering-gallery microresonators: precession approach for spherical mode analysis and emission patterns with prism couplers // *Optics Communications*. 1994. Vol. 113. No. 1-3. P. 133.