МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Лихачёв Григорий Васильевич

Оптические частотные гребенки и солитоны в микрорезонаторах

Специальность 01.04.01 —
«Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

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

Научные руководители: доктор физ.–мат. наук, профессор
Городецкий Михаил Леонидович
доктор физ.–мат. наук, профессор
Биленко Игорь Антонович

Официальные оппоненты: **Мурзина Татьяна Владимировна,**
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова. Физический факультет, доцент

Карташов Ярослав Вячеславович,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Спектроскопии РАН, ведущий научный сотрудник

Величанский Владимир Леонидович,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится 30 мая 2019 г. в 14-30 часов 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. СФА.
E-mail: igorkartashov@mail.ru Телефон для справок: +7 (495) 939-25-47.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на сайте ИАС «ИСТИНА». *http://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/34133295/*

Автореферат разослан 26 апреля 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.01.12,
к.ф.-м.н. Карташов Игорь Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Открытие в 2007 году оптических частотных гребенок в оптических микрорезонаторах [1] и последующая демонстрация в 2014 году оптических временных солитонов [2] с низким уровнем фазового шума вызвали волну интереса и исследований в области микрорезонаторов и частотной метрологии [3;4]. Оптическая частотная гребенка в микрорезонаторе (далее также называемая керровской частотной гребенкой или оптической гребенкой) представляет собой набор эквидистантных спектральных линий, получающихся каскадно при накачке микрорезонатора из нелинейного материала с помощью лазера непрерывного излучения. Керровские частотные гребенки имеют расстояния между линиями 5-1000 ГГц и позволяют достичь минимальных габаритов устройств, недостижимых для оптических гребенок, полученных с помощью фемтосекундных лазеров с синхронизацией мод. В последние годы наблюдается быстрый и значительный прогресс в этой области. За прошедшее с открытия время был проведен теоретический анализ и обширное численное моделирование богатой нелинейной динамики процесса формирования оптических гребенок. Солитонный режим оптических гребенок был продемонстрирован в кристаллических резонаторах из MgF_2 [2], в интегральных микрорезонаторах из Si_3N_4 [5], Si [6], SiO_2 [7], $LiNbO_3$ [8]. Ширина оптической гребенки из интегрального микрорезонатора достигла октавы [9], солитоны были продемонстрированы в ближнем ИК на границе видимого [10], телекоммуникационном диапазоне на 1.55 мкм [2] и среднем ИК [11]. Оптические частотные гребенки в микрорезонаторах характеризуются сложной динамикой и привели к наблюдению различных эффектов: генерации светлых солитонов [2], темных солитоноподобных импульсов [12], излучения дисперсионных волн [5], Рамановского самовоздействия и сдвига частоты [13], Стоксовых солитонов [14], бризерных режимов [15], солитонных кристаллов [16]. Были проведены эксперименты, демонстрирующие их разнообразные практические применения: калибровка эшелле-спектрографов для поиска экзопланет [17], прямая спектроскопия поглощения веществ методом двойной гребенки [18], оптические часы [19], источник каналов в телекоммуникации с рекордной пропускной способностью [20], компактный радиофотонный источник СВЧ сигнала с низким уровнем фазового шума [21], источник импульсов для быстрого измерения расстояний с высокой точностью (ЛИДАР) [22], полностью интегральный синтезатор оптических частот [23].

Количество публикаций с 2014 по 2018 годы с ключевыми словами "солитоны в оптических резонаторах"составило около 600, из них несколько десятков в самых высокорейтинговых научных журналах. В случае

преодоления нескольких нерешенных проблем, оптические частотные гребенки из микрорезонаторов могут стать востребованным коммерческим продуктом.

Несмотря на обширное изучение оптических частотных гребенок и солитонов в микрорезонаторах, остаются нерешенными важные задачи: генерация оптической гребенки шириной в октаву с расстоянием между линиями менее 100 ГГц, доступном для детектирования современной электроникой и полная ее стабилизация; создание генератора гребенки в полностью интегральном исполнении, включая лазер накачки; повышение энергетической эффективности процесса нелинейного преобразования частот, повышение мощности оптической гребенки; детерминированная генерация оптических гребенок с малыми шумами при нормальной дисперсии групповой скорости резонатора, детерминированная генерация односолитонных режимов как в одном, так одновременно и в нескольких резонаторах.

Целью данной работы является поиск методов генерации оптических частотных гребенок в микрорезонаторах при различной дисперсии групповой скорости на различных длинах волн накачки, экспериментальное получение солитонов в кристаллических микрорезонаторах и изучение их возможных приложений.

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

1. Разработать численный метод моделирования динамики оптических частотных гребенок в микрорезонаторах.
2. Разработать методику изготовления кристаллических микрорезонаторов с высокой добротностью.
3. Создать экспериментальную установку для изучения свойств кристаллических микрорезонаторов.
4. Экспериментально получить солитонный режим генерации керровской гребенки, изучить его свойства и продемонстрировать практические применения.

Научная новизна:

1. На основе численного моделирования были указаны ограничения на ширину оптической гребенки в зависимости от дисперсии групповой скорости резонатора и на влияние эффекта нормального расщепления мод на возможность генерации солитонов.
2. На основе численного моделирования был предложен оригинальный метод генерации оптических частотных гребенок при нормальной дисперсии групповой скорости в резонаторе при отклонении дисперсионного закона от параболического вида.
3. На основе численного моделирования был предложен оригинальный метод генерации оптических частотных гребенок при нормальной дисперсии групповой скорости в резонаторе при

использовании двухчастотной или амлитудно-модулированной накачки.

4. Впервые была продемонстрирована методика изготовления идентичных по форме кристаллических микрорезонаторов высокой добротности с различием по диаметру не более 1 мкм.
5. Впервые продемонстрирована возможность одновременной генерации солитонов в идентичных микрорезонаторах, расположенных на одном кристаллическом цилиндре.
6. Впервые продемонстрирована возможность одновременной генерации нескольких солитонов в одном резонаторе на разных семействах пространственных мод, распространяющихся как в одном, так и в противоположных направлениях. Продемонстрирована применимость данного метода для спектроскопии поглощения веществ.
7. Впервые продемонстрирована возможность долговременной стабилизации частоты повторения солитона с помощью эффекта захватывания на боковую линию амплитудной модуляции лазера накачки.

Практическая значимость разработанной методики изготовления кристаллических микрорезонаторов заключается в возможности повторяемо изготавливать высокодобротные микрорезонаторы с заданными характеристиками. Экспериментальная демонстрация генерации двойных оптических гребенок в одном резонаторе на разных семействах мод имеет прямое приложение в устройствах спектроскопии поглощения и устройствах быстрого измерения расстояний. Экспериментальная демонстрация стабилизированного солитонного режима имеет прямое практическое применение как источника высокостабильного СВЧ сигнала на частоте повторения солитона.

Методология и методы исследования. В работе использовались как общенаучные методы: анализ, наблюдение, сравнение, эксперимент, так и специальные методы численного компьютерного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный вычислительный пакет программ, основанный на решении системы уравнений для нелинейно связанных мод, дает точную картину процесса генерации оптических частотоных гребенок и солитонов в резонаторах из материалов с кубичной нелинейностью. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными по режимам генерации оптических частотных гребенок и их свойствам.
2. Использование двухчастотной или амплитудно-модулированной накачки с разницей частот, кратной области свободной дисперсии

резонатора, приводит к возможности генерации темных солитоноподобных структур в микрорезонаторах с нормальной дисперсией групповой скорости.

3. Разработанный метод изготовления кристаллических микрорезонаторов с помощью алмазного точения и полировки алмазными суспензиями позволяет воспроизводимо изготавливать идентичные по форме микрорезонаторы с добротностью более 5×10^8 с различием по диаметру не более 1 мкм.
4. В двух микрорезонаторах из MgF_2 оптимизированной формы, изготовленных на одном кристаллическом цилиндре, возможна воспроизводимая одновременная генерация оптических временных солитонов, обладающих узкими СВЧ сигналами биений так, что разность частот повторений солитонов в этих двух микрорезонаторах не превышает 2 МГц.
5. Высокодобротные кристаллические микрорезонаторы из MgF_2 поддерживают одновременную генерацию оптических временных солитонов на разных пространственных семействах мод, распространяющихся как в одном, так и в противоположных направлениях. Результирующий СВЧ сигнал мультигетеродинирования двух оптических солитонов может использоваться для проведения спектроскопии поглощения веществ для оптических линий, находящихся в области спектрального покрытия солитонов.

Достоверность полученных результатов определяется адекватностью использованных физических моделей и математических методов, выбранных для решения поставленных задач, корректностью использованных приближений, а также соответствием результатов теоретических и численных расчетов и экспериментальных данных. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Численная модель основана на решении системы нелинейных дифференциальных уравнений, полученных из уравнений Максвелла. Использовались широко известные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений. В основе экспериментальных исследований лежали классические методы оптики и методики измерений физических величин.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. Microresonator Frequency Combs and Applications, Аскона, Швейцария 2014
2. CLEO/QELS US, Сан-Хосе, США 2014
3. PQE-2015, Сноуберд, США 2015
4. CLEO US, Сан-Хосе, США 2015

5. XV Всероссийская школа-семинар "Физика и применение микроволн"имени профессора А.П. Сухорукова ("Волны-2015"), Красновидово, Россия 2015
6. Third International Conference on Quantum Technologies (ICQT 2015), Москва, Россия 2015
7. SPIE Photonics West, Сан-Франциско, США 2016
8. 2016 International Conference Laser Optics (ICLO), Санкт-Петербург, Россия 2016
9. SPIE Photonics West, Сан-Франциско, США 2017
10. Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2017 in St Petersburg), Санкт-Петербург, Россия 2017
11. XVI Всероссийская школа-семинар "Физика и применение микроволн"имени профессора А.П. Сухорукова ("Волны-2017"), Красновидово, Россия 2017
12. CLEO Europe and EQEC, Мюнхен, Германия 2017
13. XVII Всероссийская школа-семинар "Физика и применение микроволн"имени профессора А.П. Сухорукова ("Волны-2018"), Красновидово, Россия 2018
14. Photonics West, Сан-Франциско, США 2018
15. CLEO US, Сан-Хосе, США 2018
16. 2018 International Conference Laser Optics (ICLO), Санкт-Петербург, Россия 2018
17. European Frequency and Time Forum, Турин, Италия 2018
18. CLEO Pacific Rim 2018, Гонконг 2018
19. Frontier in Optics 2018, Вашингтон, США 2018

Личный вклад. Все результаты, вошедшие в диссертационную работу, получены либо лично автором, либо совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации, при этом вклад автора был определяющим или равным с основным соавтором.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных изданиях, 11 из которых изданы в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава содержит обзор литературы, посвященной генерации оптических частотных гребенок и солитонов в микрорезонаторах. Над развитием этой новой области работают около 10 экспериментальных групп и еще несколько теоретических групп. За 11 прошедших с открытия лет

был проведен обширный теоретический анализ и численное моделирование богатой нелинейной динамики процесса формирования оптических гребенок, были проведены эксперименты, демонстрирующие их фундаментальные свойства и важнейшие практически применения. Дан обзор многочисленных работ посвященных теоретическому и численному моделированию динамики генерации оптических гребенок, как шумных, так и высококогерентных. Рассмотрены работы посвященные экспериментальной демонстрации оптических гребенок и солитонов в кристаллических, интегральных резонаторах из различных материалов при накачке на длинах волн от видимого до среднего ИК. Сделан обзор экспериментальных демонстраций различных эффектов: излучения дисперсионных волн, Рамановского сдвига центра солитона, бризерных режимов солитонов, Стоксовых солитонов, различных методов контроля дисперсии групповой скорости резонаторов.

Наблюдение диссипативных керровских солитонов в микрорезонаторах вызвало не только интерес к изучению богатой нелинейной физики солитонов, но и демонстрацию множества применений в высокоточной метрологии и других технологиях. Даны обзоры продемонстрированных применений оптических частотных гребенок и солитонов: оптические часы, перенос точности СВЧ стандарта частоты в оптический диапазон, калибровка астрономических эшелле-спектрографов, прямая спектроскопия поглощения веществ с использованием двух оптических гребенок, в роли оптического источника в установке для спектрального уплотнения телекоммуникационных каналов и когерентной передачи данных, в роли источника СВЧ сигнала с низким уровнем фазового шума, в роли источника импульсов для быстрого измерения расстояний (ЛИДАР), или как интегральный синтезатор оптических частот.

Вторая глава посвящена численному моделированию динамики генерации оптических частотных гребенок и солитонов, исследованию различных режимов генерации и поиску оптимальных параметров.

В п. 2.1 представлен вывод системы уравнений для связанных мод из уравнений Максвелла в оптически нелинейном микрорезонаторе. Показана эквивалентность этой модели и уравнения Луджиато-Лефевера. Это уравнение получается из нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) добавлением слагаемых, отвечающих за диссипацию и накачку. НУШ является интегрируемой системой, для поиска решений которой используется метод обратной задачи рассеяния. Уравнение Луджиато-Лефевера не является интегрируемой системой, необходимо численное моделирование.

В п. 2.2 описаны используемые численные методы с их сравнением: метод Рунге-Кутты с адаптивным шагом и оптимизацией для быстрого вычисления нелинейной суммы, а также Фурье метод расщепления по параметрам для численного решения уравнения Луджиато-Лефевера. Был

реализован удобный программный интерфейс в среде Matlab для моделирования обоими методами при различной настройке всех параметров.

В п. 2.3 по результатам моделирования были выявлены параметры и режимы, при которых возможно достижение солитонного режима (рис. 1). Был учтен нагрев резонатора, влияние различной связи и мощности накачки, а также ключевой параметр - отстройка частоты лазера накачки от собственной частоты моды резонатора (ζ_0). Найденный при численном моделировании профиль сканирования частоты лазера накачки, позволил экспериментально обнаружить солитоны в микрорезонаторах. Было проведено моделирование при различных значениях дисперсии высоких порядков, численно получена генерация дисперсионной волны, мощность и положение спектрального пика при этом хорошо совпали с экспериментальными значениями. Выявлены диапазоны параметров дисперсии высших порядков, препятствующие образованию солитонов, а также влияние эффекта нормального расщепления мод вблизи моды накачки на возможность генерации солитонов в многомодовых резонаторах. Результаты моделирования хорошо совпали с экспериментальными данными.

В п. 2.4 и 2.5 с помощью численного моделирования динамики оптических гребенок в микрорезонаторах с нормальной дисперсией групповой скорости резонатора, было найдено два новых метода генерации темных солитоноподобных структур (рис. 2): 1) метод, основанный на локальном изменении дисперсионного закона вблизи моды накачки; 2) метод, основанный на использовании двухчастотной или амплитудно-модулированной накачки с частотой модуляции кратной области свободной дисперсии резонатора. В обоих случаях были исследованы области существования и мягкого возбуждения оптических гребенок, определены зависимости от величины дисперсии, мощности накачки, глубины модуляции или величины сдвига моды накачки по частоте. Показано значительное увеличение суммарной мощности оптической гребенки в режиме нормальной дисперсии по сравнению с гребенками, получаемыми при аномальной дисперсии в микрорезонаторе.

Результаты главы 2 были опубликованы в статьях с номерами A1,A2,A3,A5 из списка публикаций.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию методов генерации оптических частотных гребенок и солитонов в кристаллических микрорезонаторах и изучению их свойств.

В п. 3.1 разработана методика изготовления кристаллических микрорезонаторов методом алмазного точения с последующей полировкой алмазными суспензиями. Даны практические замечания по воспроизводимому изготовлению кристаллических микрорезонаторов заданной геометрии и высокой добротности. В ходе работы были изготовлены резонаторы с добротностью не менее 10^8 из кристаллических материалов MgF_2, BaF_2,

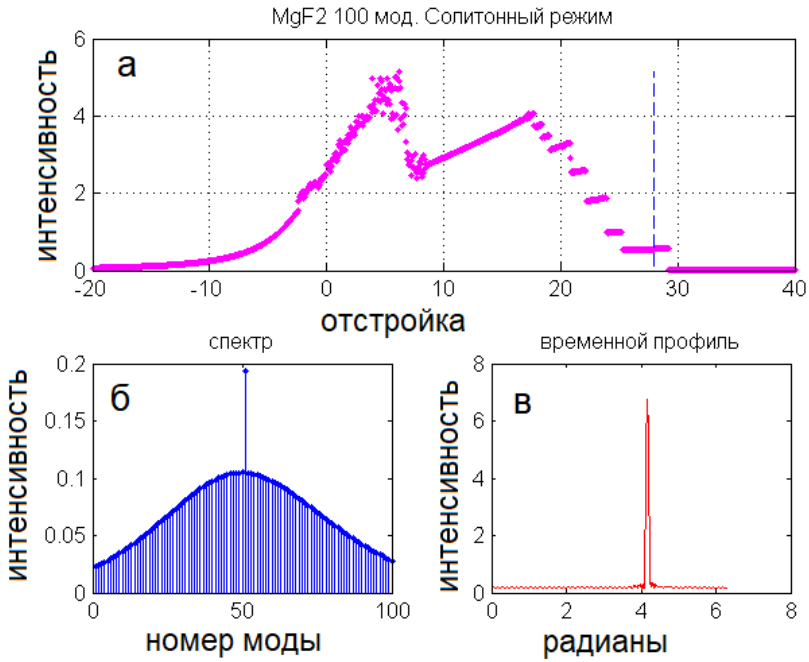

Рис. 1 — Моделирование динамики генерации оптической частотной гребенки для 100 мод в резонаторе из MgF_2. Лазер накачки перестраивается по частоте линейно во времени. (а) Зависимость интенсивности суммарного поля внутри резонатора от отстройки частоты лазера, видны характерные ступеньки, соответствующие солитонному режиму. (б) спектр и (в) соответствующий ему временной профиль солитона на указанной вертикальном пунктиром отстройке.

CaF_2, $LiNbO_3$, LiF, YLiF:Yb и с добротностью не менее 10^7 из материалов: $LiTaO_3$, SiO_2, TGG, YLiF:Tm. Методика позволяет воспроизводимо изготавливать микрорезонаторы с заданной геометрией с точностью по диаметру до 1 мкм. Минимальный диаметр изготовленных резонаторов составил 100 мкм, максимальный 16 мм. Были успешно изготовлены резонаторы с микровыступами, в которых оптическое поле было локализовано в прямоугольном выступе на образующей цилиндра размером 5 на 10 мкм (см. рис. 3).

В п. 3.2.1 дано описание экспериментальной установки, использующейся в большинстве экспериментов. Экспериментально продемонстрирована генерация некогеренных оптических частотных гребенок с шириной спектра до 300 нм в резонаторах из MgF_2. Продемонстрирован солитонный режим генерации в резонаторах из MgF_2 различного диаметра, с шириной спектра солитона до 120 нм при накачке на 1550 нм (см. рис 4). Измерен узкий сигнал биений (меньше 1 кГц) на частоте повторения

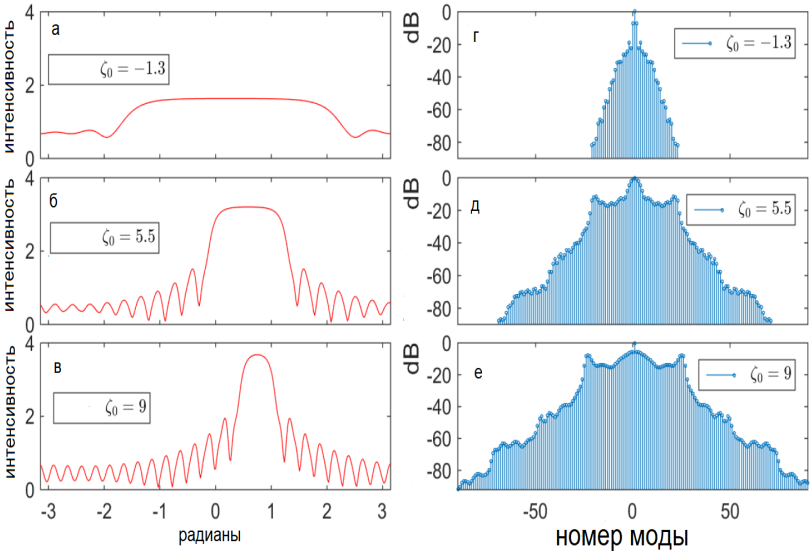

Рис. 2 — (а-в) Характерные профили поля внутри резонатора с нормальной дисперсией и (г-е) спектры темных солитоноподобных структур для различных значений отстройки частоты лазера (ζ_0), получающиеся при локальном изменении дисперсионного закона вблизи моды накачки.

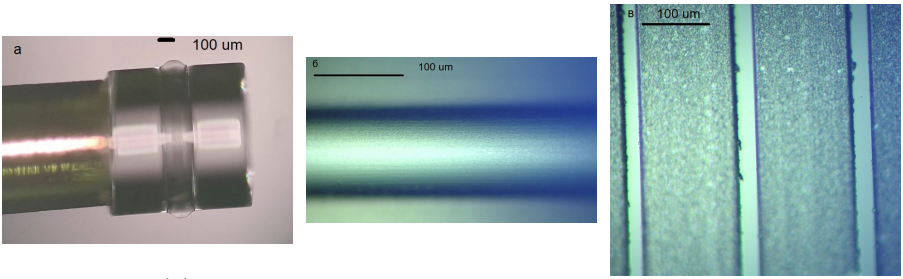

Рис. 3 — (а) фото отполированного резонатора диаметром 1 мм на латунной подставке. (б) фото поверхности резонатора из MgF_2 сразу после точения, в котором достигается добротность 10^6. (в) фрагмент поверхности резонатора с прямоугольными выступами размером 5 на 20, 25 мкм.

солитона для различных микрорезонаторов. Показан метод контроля величины текущей отстройки частоты лазера накачки от собственной частоты моды резонатора с помощью анализатора цепей (панорамного индикатора) и фазовой модуляции лазера накачки с линейно изменяющейся частотой. Этот метод также позволяет определить наличие солитонного режима и количество распространяющихся солитонов в резонаторе без использования

оптического спектроанализатора. Далее продемонстрирован метод стабилизации отстройки частоты лазера от моды резонатора с помощью схемы Паунда-Древера-Холла (PDH), показан вид сигнала ошибки, описан метод подбора оптимальных параметров для PID контроллера. Была измерена спектральная плотность мощности фазового шума сигнала биений на частоте повторения солитона со значениями -70 дБн/Гц на отстройке 1 кГц, -97 дБн/Гц на отстройке 10 кГц, для накачки резонатора использовался волоконный лазер с мгновенной шириной линии около 1 кГц. Отдельно было проведено сравнение генерации солитонов в микрорезонаторе в режиме затягивания многочастотного мощного диодного лазера на высокодобротную моду микрорезонатора из нелинейного материала MgF_2 и с накачкой перестраиваемым одночастотным волоконным лазером с усилителем. Показано, что обоими методами солитоны могут быть возбуждены на одном и том же семействе мод резонатора.

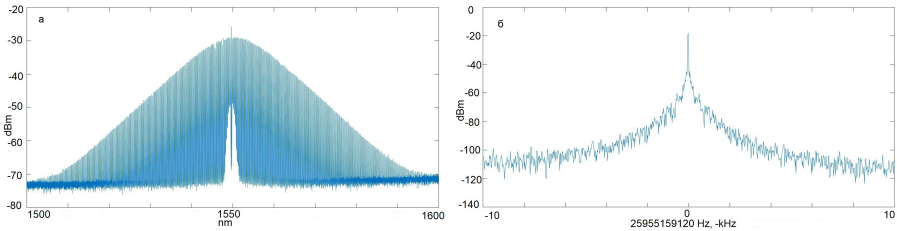

Рис. 4 — (а) оптический спектр односолитонного режима, полученный в резонаторе диаметром 2.4 мм. (б) узкий сигнал биений на частоте повторения солитона 25.95 ГГц, ширина сигнала 100 Гц.

В п. 3.2.2 показан метод достижения односолитонного режима с помощью фазовой или амплитудной модуляции лазера накачки на частоте повторения солитона. С помощью численного моделирования показано, что статистика генерации многосолитонных режимов значительно изменяется при включении слабой резонансной модуляции на частоте строго равной 1 области свободной дисперсии резонатора. Для фазовой модуляции возможны два равновероятных сценария: возбуждение односолитонного режима или отсутствие генерации солитонов. Показано, что важным фактором, увеличивающем вероятность односолитонного режима, является уменьшение скорости сканирования частоты лазера. Экспериментально показано, как модуляция накачки радикально меняет распределение вероятностей для числа генерируемых солитонов, и определены условия, при которых односолитонный режим становится достижимым и наиболее вероятным.

В п. 3.2.3 проведено исследование зависимости свойств солитонов от отстройки частоты лазера накачки. Ключевым параметром, описывающим динамику частотных гребенок и солитонов в микрорезонаторах является

отстройка частоты лазера накачки от частоты резонанса. Из приближенного решения стационарного уравнения НУШ видно, что ширина гребенки пропорциональна квадратному корню из отстройки. При увеличении отстройки лазера мощность солитона растет, а длительность уменьшается (см. рис. 5), при этом незначительно растет частота повторения солитонов из-за сдвига его спектрального максимума, вызванного более сильным эффектом нормального расщепления мод. Величина отстройки также ограничивает максимально допустимое число солитонов в мультисолитонном режиме, которые могут распространяться без взаимодействия.

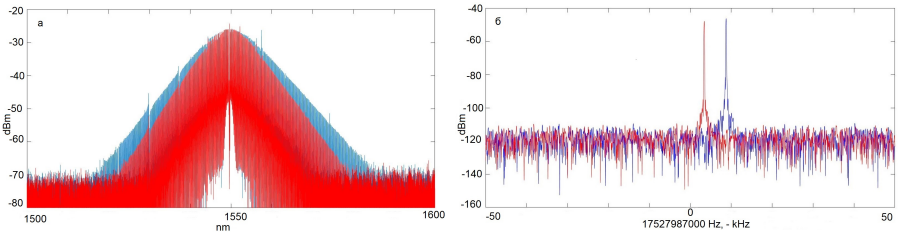

Рис. 5 — (а) оптические спектры односолитонных режимов, возбужденных на одной моде при разных отстройках частоты лазера накачки (красным - отстройка 2.5 МГц, синим - 4 МГц). (б) соответствующие сигналы биений на частоте повторения солитона, виден сдвиг частоты на 5 кГц при увеличении отстройки.

В п. 3.2.4 показано экспериментально (см. рис. 6), что при фазовой или амплитудной модуляции лазера накачки строго на частоте повторения солитона, возможно захватывание частоты повторения солитона частотой модуляции (диапазон захватывания около 1 кГц), т.ч. стабильность частоты повторения солитона на больших временах определяется стабильностью задающего генератора.

В п. 3.3 представлены результаты экспериментального наблюдения термооптических осцилляций в микрорезонаторе из BaF_2 при накачке лазером мощностью 25 мВт. В резонаторах из BaF_2 диаметром 3.9 мм экспериментально наблюдался эффект вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна при накачке на длине волны 1550 нм, измерена частота сдвига Мандельштама-Бриллюэна в 8.27 ГГц и ширина соответствующих сигналов биений. В микрорезонаторе диаметром 400 мкм из BaF_2 экспериментально продемонстрирована каскадная генерация нескольких линий оптической частотной гребенки на значительном удалении от линии накачки и одновременное вынужденное комбинационное рассеяние на длине волны 1615 нм, что соответствует табличному значению для рамановского сдвига в материале.

Результаты главы 3 были опубликованы в статьях с номерами A4,A6,A8,A10,A11 из списка публикаций.

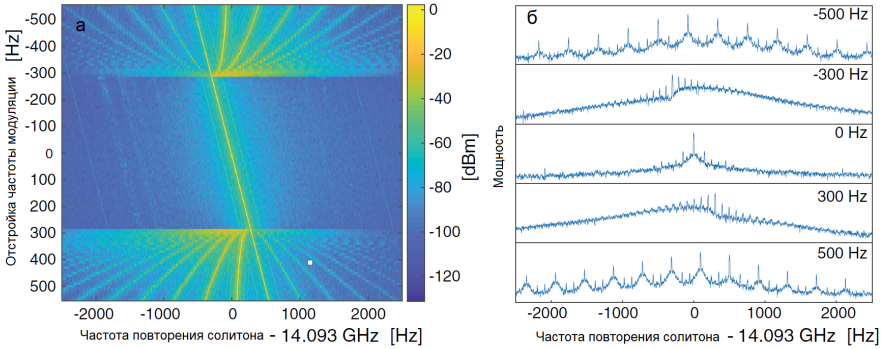

Рис. 6 — (а) спектрограмма эффекта захватывания частоты повторения солитона на линейно перестраиваемую частоту фазовой модуляции лазера накачки, видна область затягивания шириной 600 Гц, (б) спектр сигнала, полученный на быстродействующем фотодетекторе в режиме без захватывания (-500 Гц) и с захватыванием (0 Гц).

В **четвертой главе** приведены методы генерации двойных оптических гребенок и солитонов в кристаллических микрорезонаторах.

В п. 4.1 экспериментально показана одновременная генерация двух солитонных оптических гребенок в двух различных резонаторах при накачке двумя независимыми лазерами (см. рис. 7). Для генерации нескольких солитонных оптических гребенок с практически идентичными частотами повторения была разработана структура с несколькими резонаторами одинаковой формы, выточенными на одном кристаллическом цилиндре из MgF_2. В результате финальной полировки разница в ОСД между несколькими резонаторами была не более 10 МГц, что соответствует разнице в радиусах резонаторов в 0.5 мкм при условии возбуждении одного семейства мод в обоих резонаторах. Солитоны были получены последовательно в трех из пяти резонаторах на одном цилиндре. При одновременном возбуждении оптические спектры мультисолитонных состояний в обоих резонаторах содержат более 300 линий, разделенных по 12.1 ГГц и покрывает 35 нм около центральной частоты 1554 нм. Результирующий сигнал биений на фотодетекторе от двух оптических гребенок отображает двойную оптическую гребенку в радиодиапазон, имеет общую ширину 300 МГц с центром на 1.07 ГГц и содержит около 150 линий, разделенных на 1.62 МГц, каждая шириной 200 кГц и имеет огибающую, совпадающую с оптическими профилями двух солитонов.

В п. 4.2 экспериментально показана одновременная генерация двух солитонных оптических гребенок в одном резонаторе на разных семействах мод, распространяющихся в одном направлении (см. рис. 8), при накачке мощным перестраиваемым лазером и одной боковой линией амплитудной модуляции лазера. На рис. 9 показаны оптические спектры

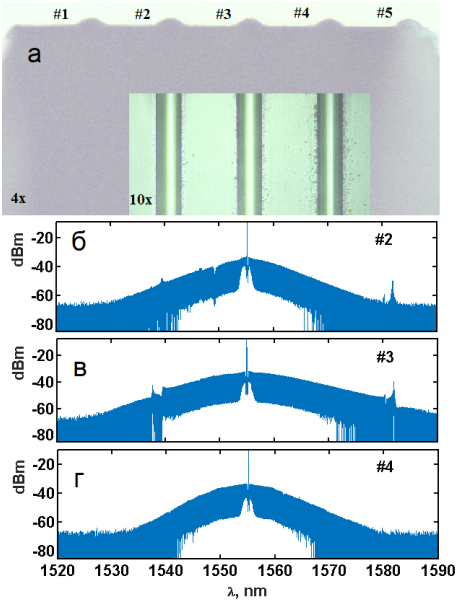

Рис. 7 — (а): Фото стэка резонаторов на одном кристаллическом цилиндре с диаметром 5.68 мм. Вставка показывает 3 отполированных резонатора, в которых наблюдались солитоны; (б-г): оптический спектр солитонов, генерируемых в 3 различных резонаторах. Солитонные керровские частотные гребенки имеют ширину 30 – 65 нм с расстоянием между линиями 12.1 ГГц.

одновременно двух солитонов на разных семействах мод с разницей по частоте накачки 4.28 ГГц. Разница в частотах повторения солитонов составила 655 кГц (частота повторения 12.4 ГГц). Ширина индивидуальных линий результирующей СВЧ гребенки менее 100 Гц, что говорит о высокой взаимной когерентности двух солитонов, хотя вся система не стабилизирована (частота повторения солитонов и лазер накачки не привязаны ни к каким эталонам). Отображение оптического спектра двойной гребенки на СВЧ спектр взаимно однозначно, 200 МГц радио спектра отображаются на 3 ТГц оптического диапазона без каких-либо наложений. Экспериментально показано, что хотя солитоны распространяются в различных пространственных семействах мод, они могут эффективно взаимодействовать между собой через четырехволновое взаимодействие, и могут быть модулированными на частоте, кратной разности частот повторений солитонов.

В п. 4.3 экспериментально показана одновременная генерация двух солитонных оптических гребенок в одном резонаторе на разных семействах мод, распространяющихся в противоположных направлениях (см.

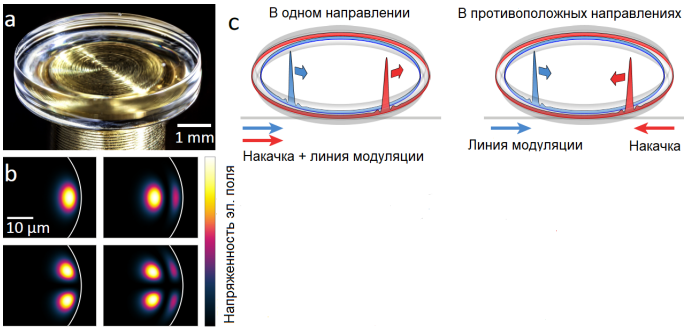

Рис. 8 — (a) Фотография многомодового резонатора MgF_2 диаметром 5.5 мм; (b) примеры численного моделирования различных семейств мод и распределения электрического поля внутри МШГ; (c) схема возбуждения солитонов с распространением в одном или противоположных направлениях.

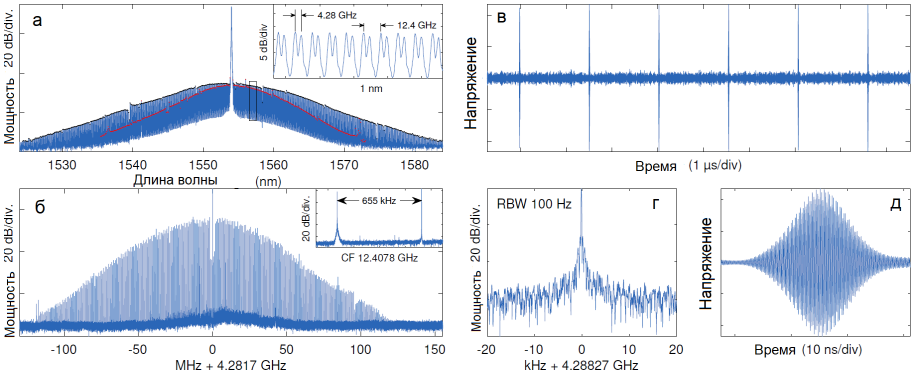

Рис. 9 — Экспериментальные результаты одновременного возбуждения односолитонных режимов на двух разных семействах мод в 1 микрорезонаторе. (а) суммарный оптический спектр односолитонных режимов, красной линией помечена огибающая второго солитона, на вставке представлены отдельные оптические линии двух солитонов. ОСД резонатора 12.4 ГГц, расстояние между несущими 4.28 ГГц. (б) результирующий сигнал биений двух солитонов на быстром фотодиоде - СВЧ гребенка с расстоянием между линиями 655 кГц, которое соответствует разнице между ОСД семейств мод, на вставке изображены сигналы частот повторения двух солитонов, (в) сигнал последовательности результирующих СВЧ импульсов, снятый быстрым осциллографом, (г) одиночная нецентральная линия СВЧ гребенки шириной менее 100 Гц, (д) сигнал одиночного СВЧ импульса.

рис. 8), при накачке мощным перестраиваемым лазером и одной боковой линией амплитудной модуляции лазера. Были использованы моды из пары семейств с разницей в собственных частотах 2.75 ГГц и разницей в частотах повторения 371 кГц, оптические спектры односолитонных режимов даны на рис. 10. Мощность каждого солитона после подавления накачки около 400 мкВт. Соответствующая результирующая СВЧ гребенка имела тот же уровень стабильности, что и в схеме с распространением в одном направлении, с шириной индивидуальной линии около 500 Гц. Показано основное преимущество схемы - отсутствие кроссмодуляции между солитонами, и возможность их разделить в пространстве и использовать отдельно. Далее продемонстрировано применение метода двойной оптической гребенки для прямой спектроскопии поглощения веществ, измерены оптические линии поглощения шириной порядка 100 ГГц с разрешением, определяющимся ОСД резонатора 12.4 ГГц.

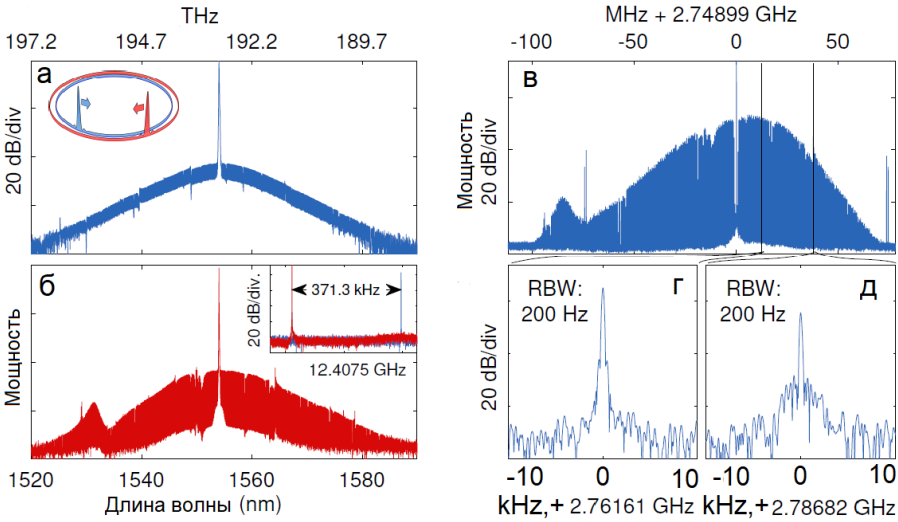

Рис. 10 — Экспериментальные результаты одновременного возбуждения солитонов в противоположных направлениях в 1 резонаторе на разных семействах мод. (а,б) Оптические спектры односолитонных режимов, полученных на разных семействах. На вставке показаны наложенные друг на друга сигналы биений на частоте повторения солитонов. Разница в частотах повторений составила 371 кГц. (в) Результирующая СВЧ гребенка, получаемая на фотодетекторе при совмещении солитонов, распространяющихся в противоположном направлении, центральная частота совпадает с частотой модуляции 2.748 ГГц, расстояние между линиями 371 кГц. (г,д) Ширина индивидуальных линий СВЧ гребенки порядка 500 Гц.

В п. 4.4 описывается экспериментально продемонстрированая одновременная генерация солитонных оптических гребенок в одном резонаторе на одном семействе мод в противоположных направлениях. Показано, что предложенный в п. 4.3 метод генерации солитонов в одном резонаторе в противоположных направлениях применим не только при накачке разных семейств мод, но возможен и на одном семействе мод, для этого на амплитудный модулятор подается частота не выше максимальной отстройки, при которой существует солитон. Так как частота повторения солитонов зависит от отстройки частоты накачки, то при небольшом сдвиге накачки в прямом и обратном направлениях возможно образование результирующей СВЧ гребенки. Найдено пороговое значение отстройки (2 МГц), меньше которой частоты повторения солитонов строго совпадают и двойная гребенка не наблюдается. Экспериментально обнаружено, что частоты повторений солитонов могут совпасть и при таком значении отстройки, когда проявляются сильные эффекты нормального расщепления мод.

Результаты главы 4 были опубликованы в статьях с номерами A7,A9 из списка публикаций.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Численные исследования модели уравнений связанных мод показали, что в высокодобротных микрорезонаторах возможна генерация оптических солитонов, были изучены диапазоны параметров и условия, влияющие на их эффективную генерацию.
2. Математическое моделирование показало, что при нормальной дисперсии групповой скорости резонатора возможна генерация темных солитоноподобных структур при условии отличия закона дисперсии от параболического вида рядом с модой накачки или при использовании двухчастотной или амплитудно-модулированной накачки.
3. Для выполнения экспериментальных исследований была разработана методика изготовления кристаллических микрорезонаторов методом алмазного точения и полировки алмазными суспензиями. Она позволила изготовить высокодобротные резонаторы из различных материалов с оптимизированной геометртей для работы с различными элементами связи.
4. Экспериментально была продемонстрирована генерация оптических солитонов в резонаторах из MgF_2 с частотами повторений от 8.5 до 27 ГГц. При активной стабилизации температуры и отстройки частоты лазера накачки солитон существовал длительное время (до 3 часов), достаточное для экспериментальной демонстрации применений.

5. Впервые продемонстрирована возможность одновременной генерации солитонов в идентичных микрорезонаторах, расположенных на одном кристаллическом цилиндре.
6. Впервые продемонстрирована возможность одновременной генерации солитонов в одном резонаторе на разных семействах пространственных мод, распространяющихся как в одном, так и в противоположных направлениях. Показана применимость метода для спектроскопии поглощения веществ.
7. Продемонстрирован метод стабилизации частоты повторения солитона с помощью эффекта захватывания на частоту амплитудной модуляции лазера накачки.

Список публикаций автора по теме диссертации, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:

*A*1. Herr T., Brasch V., Jost J.D., Mirgorodskiy I., Lihachev G., Gorodetsky M.L., Kippenberg T.J. Mode spectrum and temporal soliton formation in optical microresonators // Phys. Rev. Lett. — 2014. — Vol. 113. — P. 123901

*A*2. Lobanov V.E., Lihachev G., Kippenberg T.J., Gorodetsky M.L. Frequency combs and platicons in optical microresonators with normal GVD // Opt. Express. — 2015. — Vol. 23. — Pp. 7713–772

*A*3. V.E. Lobanov, G. Lihachev, M.L. Gorodetsky. Generation of platicons and frequency combs in optical microresonators with normal GVD by modulated pump // EPL. — 2015. — Vol. 112. — P. 54008.

*A*4. Lobanov V.E., Lihachev G.V., Pavlov N.G. et al. Harmonization of chaos into a soliton in Kerr frequency combs // Optics Express. — 2016. — Vol. 24, no. 24.— Pp. 27382–27394.

*A*5. Brasch V., Geiselmann M., Herr T., Lihachev G., Pfeiffer M.H.P, Gorodetsky M.L., Kippenberg T.J. Photonic chip based optical frequency comb using soliton induced Cherenkov radiation // Science. — 2016. — Vol. 351, no. 6271. — Pp. 357–360.

*A*6. Guo H., Karpov M., Lucas E., Kordts A., Pfeiffer M.H.P, Brasch V., Lihachev G., Lobanov V.E., Gorodetsky M.L., Kippenberg T.J. Universal dynamics and deterministic switching of dissipative Kerr solitons in optical microresonators // Nature Phys. — 2017. — Vol. 13, no. 1. — P. 94–102

*A*7. Pavlov N.G., Lihachev G., Koptyaev S., Lucas E., Karpov M., Kondratiev N.M., Bilenko I.A., Kippenberg T.J., Gorodetsky M.L. Soliton dual frequency combs in crystalline microresonators // Optics Lett. — 2017. — Vol. 42, no. 3. — Pp. 514–517.

*A*8. M. Anderson, N. G. Pavlov, J. D. Jost, G. Lihachev, J. Liu, T. Morais, M. Zervas, M. L. Gorodetsky, T. J. Kippenberg. Highly efficient coupling of crystalline microresonators to integrated photonic waveguides // Opt. Lett. — 2018. — Vol. 43, no. 9. — Pp. 2106–2109

*A*9. E. Lucas, G. Lihachev, R. Bouchand et al. Spatial multiplexing of soliton microcombs // Nature Photonics. — 2018. — Vol. 12, no. 11. — Pp. 699–705.

*A*10. N. G. Pavlov, S. Koptyaev, G. V. Lihachev et al. Narrow-linewidth lasing and soliton Kerr microcombs with ordinary laser diodes // Nature Photonics. — 2018. — Vol. 12, no. 11. — Pp. 694–698

*A*11. W. Weng, E. Lucas, G. Lihachev et al. Spectral Purification of Microwave Signals with Disciplined Dissipative Kerr Solitons // Phys. Rev. Lett. — 2019. — Vol. 122. — P. 013902

Литература

1. *Del'Haye P. et al.* Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator // *Nature*. — 2007. — Vol. 450. — Pp. 1214–1217.

2. *Herr T. et al.* Temporal solitons in optical microresonators // *Nature Photon.* — 2014. — Vol. 8. — Pp. 145–152.

3. *Kippenberg T.J. Holzwarth R. Diddams S.A.* Microresonator-based optical frequency combs // *Science*. — 2011. — Vol. 332. — Pp. 555–559.

4. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators / Tobias J. Kippenberg, Alexander L. Gaeta, Michal Lipson, Michael L. Gorodetsky // *Science*. — 2018. — Vol. 361, no. 6402. — URL: `http://science.sciencemag.org/content/361/6402/eaan8083`.

5. Photonic chip based optical frequency comb using soliton induced Cherenkov radiation / Brasch V., Geiselmann M., Herr T. et al. // *Science*. — 2016. — Vol. 351, no. 6271. — Pp. 357–360.

6. *Yu M. et al.* Mode-locked mid-infrared frequency combs in a silicon microresonator // *Optica*. — 2016. — Vol. 3, no. 8. — Pp. 854–860.

7. *Yi X. et al.* Soliton frequency comb at microwave rates in a high-Q silica microresonator // *Optica*. — 2015. — Vol. 2. — Pp. 1078–1085.

8. A self-starting bi-chromatic LiNbO3 soliton microcomb / Yang HE, Qi-Fan Yang, Jingwei Ling et al. // *arXiv e-prints*. — 2018. — P. arXiv:1812.09610.

9. Octave-spanning dissipative Kerr soliton frequency combs in Si3N4 microresonators / Martin H. P. Pfeiffer, Clemens Herkommer, Junqiu Liu et al. // *Optica*. — 2017. — Jul. — Vol. 4, no. 7. — Pp. 684–691. — URL: `http://www.osapublishing.org/optica/abstract.cfm?URI=optica-4-7-684`.

10. Photonic chip-based soliton frequency combs covering the biological imaging window / Maxim Karpov, Martin H. P. Pfeiffer, Junqiu Liu et al. // *Nature Communications*. — 2018. — Vol. 9, no. 1. — P. 1146. — URL: `https://doi.org/10.1038/s41467-018-03471-x`.

11. *Griffith A.G. et al.* Coherent mid-infrared frequency combs in silicon-microresonators in the presence of Raman effect // *Opt. Express*. — 2016. — Vol. 24. — Pp. 13044–13050.

12. *Xue X. et al.* Mode-locked dark pulse Kerr combs in normal-dispersion microresonators // *Nature Photon.* — 2015. — Vol. 9. — Pp. 594–600.

13. *Karpov M. et al.* Raman self-frequency shift of dissipative Kerr solitons in an optical microresonator // *Phys. Rev. Lett.* — 2016. — Vol. 116. — P. 103902.

14. Stokes solitons in optical microcavities / Qi-Fan Yang, Xu Yi, Ki Youl Yang, Kerry Vahala // *Nature Physics*. — 2016. — Sep. — Vol. 13. — Pp. 53 EP –. — URL: `https://doi.org/10.1038/nphys3875`.

15. Breathing dissipative solitons in optical microresonators / E. Lucas, M. Karpov, H. Guo et al. // *Nature Communications*. — 2017. — Vol. 8, no. 1. — P. 736. — URL: `https://doi.org/10.1038/s41467-017-00719-w`.

16. Soliton crystals in Kerr resonators / Daniel C. Cole, Erin S. Lamb, Pascal Del'Haye et al. // *Nature Photonics*. — 2017. — Vol. 11, no. 10. — Pp. 671–676. — URL: `https://doi.org/10.1038/s41566-017-0009-z`.

17. A microphotonic astrocomb / Ewelina Obrzud, Monica Rainer, Avet Harutyunyan et al. // *Nature Photonics*. — 2019. — Vol. 13, no. 1. — Pp. 31–35. — URL: `https://doi.org/10.1038/s41566-018-0309-y`.

18. *Suh M.-G. et al.* Microresonator soliton dual-comb spectroscopy // *Science*. — 2016. — Vol. 354. — Pp. 600–603.

19. *Papp S. et al.* Microresonator frequency comb optical clock // *Optica*. — 2014. — Vol. 1. — Pp. 10–14.

20. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications / Pablo Marin-Palomo, Juned N. Kemal, Maxim Karpov et al. // *Nature*. — 2017. — Jun. — Vol. 546. — Pp. 274 EP –. — URL: `https://doi.org/10.1038/nature22387`.

21. High spectral purity Kerr frequency comb radio frequency photonic oscillator / W. Liang, D. Eliyahu, V. S. Ilchenko et al. // *Nature Communications*. — 2015. — Aug. — Vol. 6. — Pp. 7957 EP –. — Article. URL: https://doi.org/10.1038/ncomms8957.

22. Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs / P. Trocha, M. Karpov, D. Ganin et al. // *Science*. — 2018. — Vol. 359, no. 6378. — Pp. 887–891. — URL: http://science.sciencemag.org/content/359/6378/887.

23. An optical-frequency synthesizer using integrated photonics / Daryl T. Spencer, Tara Drake, Travis C. Briles et al. // *Nature*. — 2018. — Vol. 557, no. 7703. — Pp. 81–85. — URL: https://doi.org/10.1038/s41586-018-0065-7.

Лихачёв Григорий Васильевич

Оптические частотные гребенки и солитоны в микрорезонаторах

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать 26.04.2019. Заказ № 954
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.
Типография ПОСТЕР МГУ