

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт спектроскопии Российской
академии наук (ИСАН),
доктор физ.-мат. наук, профессор



Задков В. Н.

«22» июня 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

*на диссертационную работу Павлова Николая Геннадьевича
«Радиофотонные устройства на базе оптических микрорезонаторов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.21 лазерная физика*

Диссертационная работа Павлова Николая Геннадьевича «Радиофотонные устройства на базе оптических микрорезонаторов» посвящена исследованию нелинейных высокодобротных кристаллических микрорезонаторов с модами шепчущей галереи и разработке новых приложений микрорезонаторов в задачах фотоники. Интерес к исследованию микрорезонаторов вызван, во-первых, их высокой добротностью ($>10^8$), что позволяет изучать нелинейные (квадратичные и кубические) эффекты при низких уровнях мощности, и во-вторых компактными размерами (от сотен микрон до нескольких миллиметров), перспективными для внедрения в различные приборы и аппаратные комплексы. В работе приведены как теоретические исследования электрооптического взаимодействия в микрорезонаторах, и затягивания частоты лазерных диодов модой микрорезонатора, так и экспериментальные результаты, подтверждающие возможность использования микрорезонаторов для передачи радиочастотных сигналов по оптическим линиям связи, спектроскопии с использованием двойных оптических гребёнок с конвертацией спектра из оптического в СВЧ диапазон и затягивания частоты лазерных диодов модой микрорезонатора для создания компактных узкополосных лазерных источников.

В диссертации были получены следующие основные результаты:

1. Был разработан и исследован элемент связи с микрорезонаторами на основе интегрального волновода из Si_3N_4 и SiO_2 .
2. Развита теория электрооптического взаимодействия мод шепчущей галереи с радиочастотным полем и продемонстрирована модуляция на частотах 200-900 МГц с использованием микрорезонатора из LiNbO_3 .
3. Разработана методика генерации двойной оптической гребенки в микрорезонаторах. Создана структура из нескольких микрорезонаторов на одном цилиндре из кристаллического MgF_2 . В данной структуре оптический спектр двойной гребенки с частотой повторения 12.1 ГГц и шириной 4 ТГц был

сконвертирован в радиочастотный диапазон шириной 300 МГц. Также впервые представлена методика генерации двойной гребенки в одном микрорезонаторе на разных семействах мод и продемонстрирована конверсия двойной гребенки с частотой повторения 12.4 ТГц и шириной 4 ТГц в оптическом диапазоне в 200 МГц в радиочастотном диапазоне.

4. Численно и экспериментально продемонстрирован переход к односолитонному режиму генерации в микрорезонаторе при использовании фазо- и амплитудно-модулированной накачки на межмодовой частоте микрорезонатора.
5. Представлен анализ эффекта затягивания частоты лазерного диода модой высокодобротного микрорезонатора. Получены простые аналитические формулы для ширины полосы затягивания и результирующей ширины линии лазера. Экспериментально продемонстрировано затягивание частоты многочастотных лазерных диодов.
6. Впервые наблюдалась генерация диссипативных керровских солитонов при накачке микрорезонатора многочастотным диодом в режиме затягивания.

Результаты работы прошли апробацию на российских и международных конференциях и опубликованы в четырех статьях, входящих в базу данных *Web of Science*.

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключение, Списка литературы и Приложения. Объем диссертации составляет 129 страниц. Работа содержит 58 рисунков и 4 таблицы.

Во Введении Павлов Н.Г. обсуждает современные достижения в области исследования микрорезонаторов с модами шепчущей галереи. Затем автор описывает цели исследования, новизну, практическую значимость работы, защищаемые положения и приводит сведения об апробации результатов.

В **Главе 1** представлена методика изготовления оптических микрорезонаторов на прецизионном станке алмазного точения. Автор подробно рассматривает параметры точения и режимы полировки микрорезонаторов из различных кристаллических материалов. В конце главы представлена таблица с оптимальными параметрами точения для широкого набора материалов, из которых производятся микрорезонаторы.

Глава 2 разделена на две части. Первая часть носит вводный характер и описывает основные механизмы, определяющие добротность микрорезонаторов. Вторая часть посвящена описанию основных элементов связи с микрорезонаторами и созданию элемента связи на основе интегрального волновода из структуры $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$. Представлено краткое описание особенностей связи с использованием такого волновода, освещен эксперимент и полученные результаты по проверке изготовленного интегрального волновода с микрорезонаторами из фторидов бария и стронция.

Глава 3 содержит основные результаты по изучению электрооптического взаимодействия мод шепчущей галереи с внешним радиочастотным полем в микрорезонаторах из ниобата лития. Здесь представлена теория электрооптического

взаимодействия с аналитическим расчетом полуволнового напряжения и численные расчеты электрооптического эффекта для различных конфигураций радиочастотных мод. Экспериментально продемонстрирован электрооптический модулятор на основе микрорезонатора из ниобата лития.

В Главе 4 описан процесс генерации керровских диссипативных солитонов в микрорезонаторах за счёт четырехволнового смешения. Описаны результаты экспериментов по генерации двойной солитонной оптической гребенки в новой структуре из нескольких микрорезонаторов, выточенных на одном цилиндре. Приведены результаты конверсии спектра двойной гребенки на частоте 1554 нм (с частотой повторения 12.1 ГГц) в радиочастотную область. Также представлен эксперимент по генерации двойной гребенки в одном микрорезонаторе на разных семействах резонансных мод с последующей конверсией в радиочастотный диапазон. Численно и экспериментально показано, что медленная перестройка частоты лазера накачки в сочетании с фазовой или амплитудной модуляцией на межмодовой частоте микрорезонатора, обеспечивает детерминированный переход из состояния оптической гребенки с хаотическим режимом в односолитонное состояние.

Глава 5 посвящена исследованию затягивания частоты лазерных диодов модой микрорезонатора с последующей генерацией керровских диссипативных солитонов. Получены аналитические формулы для ширины полосы затягивания и ширины результирующей линии затянутого лазера. Представлены экспериментальные результаты по затягиванию лазерных диодов модой высокодобротного микрорезонатора с результирующим сужением линии генерации до 1 кГц. Приведены результаты по генерации диссипативных керровских солитонов в микрорезонаторах при накачке многочастотными лазерными диодами в режиме затягивания.

В Заключение сформулированы основные научные результаты диссертации.

Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми, они находятся на переднем крае исследований в области генерации оптических гребенок, они указывают на новые возможности использования микрорезонаторов в фотонных и радиофотонных устройствах, и могут иметь большую значимость для таких практических приложений, как построение электрооптических модуляторов, спектрометров, СВЧ генераторов, узкополосных лазеров и т.д.

Полученные в работе результаты представляют несомненный интерес и могут быть рекомендованы для использования в организациях, работающих над созданием генераторов оптических гребенок, лазеров с узкой линией, электрооптических модуляторов, таких как: ИОФАН, НИИ «ПОЛЮС», ВНИИФТРИ.

Диссертация не лишена недостатков, среди которых необходимо выделить следующие:

1. Описание методики изготовления микрорезонаторов методом алмазного точения в главе 1 представляется излишне подробным и избыточным

множеством технических деталей, характерных для данной конкретной установки, которая является готовым коммерческим продуктом. Это особенно заметно в части описания использованных резцов и программ, контролирующих процесс изготовления, одна из которых даже приведена в диссертации. Если для ученых, желающих воспроизвести данные результаты, эта информация будет неоценима, то с общефизической точки зрения такая детализация не нужна, тем более, что эта методика не выносится в защищаемые положения.

2. Описание уравнения (2.9) в главе 2 недостаточно прозрачно. Казалось бы, это уравнение должно описывать амплитуду моды резонатора, при частоте источника близкой к одной из резонансных частот ω_0 , но почему тогда упоминается «система возбуждающего лазера» и как n -ый резонанс может одновременно иметь амплитуды a_0, a_n ?
3. Рисунок 3.2 с объяснением различных режимов работы модулятора не является информативным. Не объяснены понятия «фундаментальной» и «нефундаментальной» мод в том контексте, в котором они используются в рисунке. Также не объяснен смысл разных цветов для кривых, в частности для зеленой кривой на рис. 3.2.с. Во всей диссертационной работе чередуется использование терминов «межмодового интервала» и «области свободной дисперсии», что на самом деле одно и то же.
4. Рис. 4.1 должен был бы показывать внутрирезонаторную мощность как функцию отстройки (частоты лазера), а на рисунке на горизонтальной оси фигурирует неопределенное время перестройки. Говоря о возникновении области «термонелинейности» и «нелинейности, вырождающейся в ступенчатый вид», автор, по видимости, хотел сказать, что зависимость мощности от частоты становится ступенчатой, причем из текста не вполне понятно, действительно ли так важны тепловые эффекты в области, где формируется хаотическая гребенка.
5. Стоило бы привести в главе 4 уравнение Луджиато–Лефевра в переменных «угловая координата-медленное время», в дополнение к эквивалентному уравнению связанных мод (4.4). Формула (4.1) скорее является аппроксимацией к точному решению уравнения Луджиато–Лефевра с накачкой, точное же решение для одного солитона имеет существенно более сложный вид $\sim \{A+B/[\cosh(k\phi)+C]\}$. В главе 4.2 следовало бы указать, за счет чего контролировалась и контролировалась ли вообще (может быть возникла из-за дефектов изготовления?) разница в межмодовых интервалах в гребенках, генерируемых в двух микрорезонаторах.

Приведенные выше замечания, однако, не снижают общей высокой научной оценки представленной к защите диссертации и ее вклада в развитие данной области исследований. Автореферат полностью соответствует содержанию и результатам диссертации.

Диссертационная работа «Радиофотонные устройства на базе оптических микрорезонаторов», представленная Николаем Геннадьевичем Павловым, является

законченным научным исследованием, по своей тематике она полностью соответствует заявленной специальности и удовлетворяет требованиям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденном постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от «24» сентября 2013 г., а автор работы, Николай Геннадьевич Павлов, безусловно заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 лазерная физика.

Доклад по материалам диссертации был представлен автором 18 июня 2018 года на семинаре Теоретического Отдела Института спектроскопии РАН.

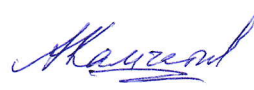
Отзыв на диссертацию составлен ведущим научным сотрудником теоретического отдела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии РАН (ИСАН), Карташовым Ярославом Вячеславовичем и одобрен на семинаре теоретического отдела Института спектроскопии РАН 18 июня 2018 г.

Ведущий научный сотрудник
теоретического отдела ИСАН,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН


Карташов Ярослав Вячеславович

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Института спектроскопии
Российской академии наук (ИСАН),
108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5
телефон: 8(495)851-02-33,
E-mail: kartashov@isan.troitsk.ru

Заведующий теоретическим отделом ИСАН,
доктор физико-математических наук


Камчатнов Анатолий Михайлович

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Института спектроскопии
Российской академии наук (ИСАН),
108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5
телефон: 8(495)851-02-38,
E-mail: kamch@isan.troitsk.ru

Подписи сотрудников Института спектроскопии
Российской академии наук Карташова Я. В. и
Камчатнова А. М. заверяю.

Ученый секретарь ИСАН,
кандидат физико-математических наук

Перминов Евгений Борисович



Список научных публикаций сотрудников Института спектроскопии РАН (ИСАН)

1. Milian C., Kartashov Y. V., Skryabin D. V., and Torner L., Clusters of Cavity Solitons Bounded by Conical Radiation, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 121, 103903, 2018.
2. Milian C., Kartashov Y. V., Skryabin D. V., and Torner L., Cavity solitons in a microring dimer with gain and loss, *Optics letters*, Vol. 43(9), 2018.
3. Skryabin D.V., Kartashov Y.V., Egorov O.A., Sich M., Chana J.K., Rodriguez L.E. Tapia, Walker P.M., Clarke E., Royall B., Skolnick M.S., Krizhanovskii D.N., Backward Cherenkov radiation emitted by polariton solitons in a microcavity wire, *Nature communications*, Vol. 8, p. 1554-1554, 2017.
4. Skryabin D.V., Kartashov Y.V., Self-locking of the frequency comb repetition rate in microring resonators with higher order dispersions, *Optics express*, Vol. 25(22), pp. 27442-27451, 2017.
5. Kartashov Y.V., Skryabin D.V., Temporal dark polariton solitons, *Optics letters*, Vol. 41(8), 1760-1763, 2016.
6. Kamchatnov A. M, Pavloff N., Interference effects in the two-dimensional scattering of microcavity polaritons by an obstacle: phase dislocations and resonances, *European Physical Journal D*, vol. 69, no. 1, art no. 32, 2015.
7. Driben R., Kartashov Y.V., Malomed B.A., Meier T., Torner L., Soliton gyroscopes in media with spatially growing repulsive nonlinearity, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 112, no. 2, 020404, 2014.