

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Моисеева Сергея Андреевича на диссертационную работу Павлова Николая Геннадьевича «Радиофотонные устройства на базе оптических микрорезонаторов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика

Диссертация Павлова Николая Геннадьевича «Радиофотонные устройства на базе оптических микрорезонаторов» посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию нелинейных высокочастотных кристаллических микрорезонаторов и их использованию для создания различных перспективных устройств квантовой электроники и радиофотоники.

Актуальность представленной работы не вызывает сомнений, что определяется большим вниманием ученых многих стран к возможности создания на этой основе лазерных устройств нового поколения, отличающихся беспрецедентной компактностью, высокой стабильностью и низким энергопотреблением. К настоящему времени работы, посвященные созданию компактных высокочастотных оптических резонаторов на модах шепчущей галереи (МШГ), позволили существенно продвинуться в миниатюризации лазеров, улучшить ряд базовых параметров лазерного излучения, а также продемонстрировали перспективы использования МШГ-микрорезонаторов в решении ряда практических задач. В частности, было показано, что МШГ-микрорезонаторы могут успешно использоваться для создания узкополосных компактных лазеров, фемтосекундных лазеров, обеспечить значительное усиление взаимодействия между микроволновым и оптическим излучением, что позволило добиться рекордной эффективности в детектировании микроволнового излучения и открыло новые перспективы в решении задач радиофотоники.

Кроме того, использование МШГ-микрорезонаторов открывает новые возможности в решении фундаментальных задач резонаторной квантовой электродинамики и электрооптики, оптической квантовой информатики.

Научная и практическая значимость диссертации обусловлена тем, что полученные в ней результаты открывают новые экспериментальные возможности в создании высокостабильных компактных диодных лазеров, генерации широкополосных оптических частотных гребенок, которые могут быть использованы для решения актуальных задач телекоммуникации, спектроскопии и фотоники. Разработанные микрорезонаторные схемы позволяют существенно повысить стабильность создаваемых устройств и значительно уменьшить уровень фазового шума, как для генерируемого оптического сигнала, так и для сигнала СВЧ диапазона в электрооптических устройствах. Экспериментально продемонстрированные малошумящие высокостабильные источники оптических и микроволновых сигналов, основанные на использовании МШГ-резонаторов, могут быть востребованы при решении ряда прикладных задач, в том числе в области метрологии и спектроскопии.

Достоверность положений и результатов диссертации обеспечивается использованием надежных апробированных теоретических и численных методов решения уравнений лазерной физики, зарекомендовавших себя технологий создания МШГ-резонаторов, применением современных экспериментальных спектроскопических методов изучения свойств оптического и микроволнового излучения. Также отметим, что полученные результаты в предельных случаях сводятся к известным, хорошо проверенным результатам других авторов, а теоретические результаты находятся в хорошем согласовании с экспериментальными данными.

Новизна выполненных исследований и полученных в диссертации результатов состоит в следующем:

1. Разработана оригинальная методика создания кристаллических МШГ-микрорезонаторов на высокоточном алмазном станке. Найдены оптимальные параметры методики создания таких резонаторов (скорость вращения шпинделя, глубина захода и т.д.) для широкого класса диэлектрических материалов (MgF_2 , CaF_2 , BaF_2 , SrF_2 , $LiNbO_3$, $LiTaO_3$).

2. Разработан новый элемент связи на основе волноводного чипа для кристаллических МШГ-микрорезонаторов и на нем экспериментально достигнута 95% эффективность связи сигнального излучения с модой микрорезонатора.
3. Проведен теоретический и численный анализ оптимального электрооптического взаимодействия в микрорезонаторе из ниобата лития. Предложенная схема реализована экспериментально. Она позволила получить модуляцию в микроволновом диапазоне [200–900] МГц с полуволновым напряжением 0.5 В.
4. Разработана и экспериментально реализована методика создания компактного источника двойной оптической гребенки для спектроскопии, или ЛИДАР приложений как на основе использования двух одинаковых МШГ-микрорезонаторов, выточенных на одном цилиндре, так и на разных семействах мод одного МШГ-микрорезонатора. Используя предложенную технику, в первом случае реализовано преобразование излучения оптического диапазона с длиной волны около 1550 нм с шириной полосы 4 ТГц в радиочастотное излучение с несущей частотой вблизи 1.07 ГГц и шириной спектра 300 МГц, а во втором случае - преобразование оптического излучения с шириной спектра 4 ТГц в радиоизлучение вблизи частоты 4.8 ГГц с шириной спектра 200 МГц.
5. Численно и экспериментально показана возможность детерминированного перехода в односолитонный режим генерации светового излучения в МШГ-микрорезонаторе, используя фазовую и амплитудную модуляцию лазерной накачки на межмодовой частоте этого микрорезонатора.
6. Проведен теоретический и численный анализ эффекта затягивания частоты лазерного диода модой высокодобротного МШГ-микрорезонатора. Получены простые аналитические формулы для ширины полосы затягивания и результирующей ширины суженной линии лазера. Экспериментально продемонстрировано, что ширина линии затягивания для многочастотных лазерных диодов, сужается в предложенной системе до ~ 1 кГц. Также впервые

экспериментально продемонстрирована генерация солитонов в МШГ-микрорезонаторах с использованием многочастотных лазерных диодов.

Диссертация изложена на 129 страницах, содержит введение, пять глав, заключение и приложение. Список литературы включает 141 наименование.

Во введении автор приводит обстоятельный обзор областей применения оптических микрорезонаторов, обосновывает актуальность рассматриваемой проблемы, формулирует цели и круг решаемых задач, а также научную новизну полученных результатов и практическую значимость выполненных исследований. В конце приводятся сведения об апробации и публикации полученных результатов и формулируются защищаемые положения диссертации.

Первая глава посвящена описанию экспериментальной методики изготовления кристаллических МШГ-микрорезонаторов различной формы на станке алмазного точения. Описываются специфические свойства и преимущества использования различных диэлектрических материалов, обосновывается их выбор для решения конкретных задач. Описываются особенности техники лазерного точения, способы ее использования для достижения высокой оптической добротности микрорезонаторов. Также предлагается метод достижения более высокой добротности, основанный на асимптотической полировке алмазными суспензиями с различным зерном. На основе проведенного экспериментального исследования разработана методика и найдены оптимальные режимы изготовления кристаллических МШГ-микрорезонаторов. Показано, что дальнейшее совершенствование методики изготовления, способной приводить к увеличению конечной добротности, возможно при более детальном изучении механизмов точения.

Материал данной главы показывает, что автор диссертации овладел ценной технологией создания МШГ-микрорезонаторов, что дало ему возможность понять ряд важных свойств таких микрорезонаторов и, судя по всему, в целом оказало большое положительное влияние на автора при проведении им экспериментальных и теоретических исследований и получении

результатов, представленных в других главах диссертации. Считаю, что приобретенный практический опыт создания резонаторов будет полезен в дальнейших экспериментальных исследованиях.

Во второй главе обсуждаются основные механизмы (поглощение, рассеяние света и потери в материале), влияющие на добротность МШГ-микрорезонатора. Также представлено описание основных элементов связи с МШГ модами, таких как призма, растянутое волокно и срезанное под углом волокно. Описан эксперимент по созданию нового элемента связи на основе интегрального волновода из структуры $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$. Реализованный новый тип связи представляет несомненный интерес благодаря достигнутой высокой квантовой эффективности переноса сигнального излучения в моду МШГ-микрорезонатора, достигающей 95 %, что уже выше квантового предела и представляет интерес для использования в устройствах оптической квантовой информатики.

Третья глава посвящена электрооптическому модулятору на основе МШГ-микрорезонатора из ниобата лития. Для этого автором разработана теория электрооптического взаимодействия в МШГ-микрорезонатора из ниобатом лития между внешним полем накачки и СВЧ полем, заполняющим пространство микрорезонатора, находящегося также в металлическом колечке, выполняющем роль СВЧ резонатора. Проведен численный расчет электрооптического взаимодействия на основе изучения нелинейного отклика среды, используя теорию возмущений в нижнем порядке по сигнальному полю. Исследована оптимальная длина СВЧ колечка для реализации наибольшего перекрытия СВЧ и оптических мод. Также автором представлена экспериментальная реализация электрооптического модулятора на базе исследуемого микрорезонатора с полуволновым напряжением $V=0.5$ В с диапазоном модуляции [200-900] МГц и минимально детектируемым напряжением 30 мВ. Полученные экспериментальные результаты демонстрируют важные перспективы использования МШГ-микрорезонаторов для реализации высокоэффективной модуляции светового излучения.

Разработанная микрорезонаторная схема может быть использована для решения различных задач, например, для создания высокоэффективного интерфейса между оптическими и микроволновыми полями, необходимого для квантовой информатики и коммуникаций. Также стоит отметить перспективность эффективной генерации предельно слабых (однофотонных) световых полей в заданном частотном диапазоне, что становится возможным благодаря высокой спектральной селективности высокодобротных МШГ-микрорезонаторов.

В четвертой главе представлен эксперимент по генерации двойной гребенки в микрорезонаторах с близкими межмодовыми интервалами. Представляется весьма интересной сама экспериментальная схема реализации генерации одиночных солитонов, основанная на одновременном использовании двух соседних МШГ-микрорезонаторов, созданных на общем цилиндре. Автором проведен детальный анализ свойств генерируемого излучения и экспериментальная реализация данной схемы. Обнаружено существенное негативное влияние генерации излучения в одном резонаторе на генерацию поля соседним микрорезонатором и показано, каким образом можно существенно подавить это влияние. Однако автор делает вывод, что экспериментальная реализация двухрезонаторной системы с заданными частотами является очень сложной задачей в силу существующих трудностей в одновременной стабилизации их частот, сильных тепловых эффектов нагрева микрорезонатора при наличии генерации в соседнем микрорезонаторе. В связи с этим им также впервые была реализована генерация двойной гребенки в одном микрорезонаторе на разных семействах МШГ мод с использованием одного лазера накачки.

Необходимо отметить, что автору удалось одновременно настроиться на генерацию одиночных солитонов сразу в двух разных семействах мод и добиться высокой стабилизации отстройки частоты лазера, при которой односолитонные режимы генерации в каждом из резонаторов существовали несколько часов. Эти эксперименты продемонстрировали высокое

экспериментальное искусство и глубокое понимание Николаем Геннадьевичем физических процессов, происходящих в очень непростой реализованной лазерной системе. В результате проведенного исследования было показано, что при независимой генерации оптических гребенок в двух различных МШГ-микрорезонаторах на длине волны 1550 нм спектр биений независимых линий гребенки может конвертироваться в СВЧ диапазон с несущей частотой около 1 ГГц с расстоянием между линиями 1.6 МГц. Второй метод позволил производить конвертацию спектра двойной гребенки вблизи длины 1550 нм в СВЧ диапазон с основной частотой около 4.8 ГГц.

При разработке эффективных методов генерации односолитонного режима возбуждения микрорезонатора автором исследовано применение гармонической фазовой (ФМ) и амплитудной (АМ) модуляции поля накачки для надежного и эффективного создания односолитонных состояний. Им проведен численный расчет и поставлен эксперимент по изучению перехода в односолитонный режим при использовании АМ и ФМ накачки на межмодовой частоте микрорезонатора. Показано, что наиболее вероятное количество генерируемых солитонов зависит от скорости сканирования частоты лазерной накачки. Используя односолитонное решение в качестве входного сигнала, обнаружено условие существования стационарных солитонов для АМ и ФМ накачки. Найдено, что для фазовой модуляции увеличение глубины модуляции приводит к более эффективной генерации одного солитона, а для амплитудной модуляции необходимо использовать оптимальное значение глубины (в зависимости от скорости сканирования) для предпочтительного односолитонного режима, тогда как большие значения глубины модуляции могут приводить к появлению двухсолитонных состояний.

В итоге автором найдено, что для получения односолитонного режима методом модуляции накачки следует использовать скорость сканирования меньше определенного критического значения, зависящего от мощности накачки и параметра дисперсии групповой скорости. Теоретические выводы качественно совпали с результатами проведенного эксперимента, который

также показал, что фазовая/амплитудная модуляция обеспечивает более эффективную односолитонную генерацию, что подтверждает перспективность предлагаемого метода.

Необходимо отметить, что реализованное излучение источника, представляющее собой суперпозицию двух близких по частоте гребенок лазерных импульсов (диссипативных керровских солитонов ДКС), может использоваться для спектроскопии и других приложений. Важно и то, что такие световые поля на основе высокодобротных микрорезонаторов позволяют реализовать прецизионный метод спектроскопии в гораздо более компактном варианте.

Последняя, пятая глава описывает теорию и поставленные эксперименты по стабилизации многочастотных лазерных диодов модой МШГ-микрорезонатора. Описана экспериментальная установка и экспериментально изучены различные режимы генерации ДК солитонов в МШГ-микрорезонаторе при накачке мощным многочастотным лазерным диодом в режиме затягивания многочастотного лазерного диода.

За этой формулировкой скрывается детальное теоретическое исследование, которое позволило автору найти простое аналитическое решение, хорошо описывающее ширину линии затягивания и ширину результирующего сужения лазерной линии. Это решение было проверено, используя численные расчеты на основе использования известных более общих динамических уравнений. В итоге Павлов Н.Г. обнаружил интересные, практически важные свойства в стабилизации лазерных диодов при их слабой связи с модами микрорезонатора. Любопытно, что обнаруженная сильная частотная стабилизация (около 1 кГц) при использовании несопоставимо широкополосного лазерного диода обусловлена очень высокой добротностью МШГ-микрорезонатора и требует стабилизации в пространственном положении микрорезонатора ~ 2.5 нм (много меньше длины волны используемого излучения). Полученные экспериментальные результаты представлены на серии графиков, детально проанализированы автором.

Показано хорошее совпадение теории с основными экспериментальными результатами.

В Заключении автор приводит основные результаты представленной работы.

Оценивая работу в целом, следует отметить, что настоящая диссертация представляет собой законченное цельное исследование, которое охватывает целый комплекс решенных теоретических и экспериментальных задач, объединенных общими целями. Хочется особо отметить, что полученные Павловым Н.Г. экспериментальные результаты хорошо согласуются с разработанной им теорией. Все представленные результаты являются новыми и интересными, их актуальность и достоверность не вызывает сомнений. Защищаемые положения и выводы хорошо обоснованы. Считаю, что основные результаты диссертации будут полезны для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований световых явлений в микрорезонаторных системах и представляют несомненную ценность при решении новых прикладных задач лазерной физики, радиофотоники, а также задач интегральной квантовой оптики и оптической квантовой информатики.

Диссертация хорошо оформлена, а результаты представлены в ней ясным и лаконичным языком. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтверждают высокую квалификацию диссертанта. Основные результаты работы докладывались лично автором на большом количестве престижных российских и международных конференций и опубликованы в ведущих научных журналах.

По тексту диссертации есть лишь несколько замечаний технического характера:

- 1) Не понятно, о какой частоте лазерного излучения идет речь, когда автор обозначает моду диодного лазера лишь величиной тока, например, на стр. 58 читаем «оптическая мода с током $I = 187$ мА» и т.д. (см. также рис. 3.14).
- 2) В уравнении (4.4) отсутствует мнимая единица « i » перед параметром ζ_m .

3) Вывод уравнения (5.2) можно было бы представить подробнее. Также в этом уравнении есть опечатка - на производную $d\phi/dt$ должна быть умножена амплитуда поля "А".

Указанные недостатки носят несущественный характер и не влияют на общую высокую оценку проведенного исследования. Считаю, что диссертационная работа «Радиофотонные устройства на базе оптических микрорезонаторов» удовлетворяет требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а Павлов Николай Геннадьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика».

Официальный оппонент



Моисеев Сергей Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры радиофотоники и
микроволновых технологий
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева»
Адрес: 420111, Казань, ул. К. Маркса,
10,
тел.:8(903)342 14 09,
электронная почта: samoi@yandex.ru
«13» сентября 2018 г.

Подпись Моисеева С.А.
заверяю. Начальник управления
делами КНИТУ КАИ
Александрово Е.Н.



Список научных публикаций профессора кафедры радиофотоники и микроволновых технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева» д.ф.-м.н. Моисеева Сергея Андреевича.

1. S.A. Moiseev, K. I. Gerasimov, R. R. Latypov, N. S. Perminov, K. V. Petrovnin, O. N. Sherstyukov, Broadband multiresonator quantum memory-interface, *Scientific Reports*, vol. 8, art. no. 3982, 2018.

2. A. M. Hatta, A. A. Kamli and O. A. Al-Hagan and S. A. Moiseev, 'Slow light with electromagnetically induced transparency in optical fiber', *JOSA B*, vol.48, no. 15, 155502, 2015.

3. S. A. Moiseev, F.F. Gubaidullin, R. S. Kirillov, R. R. Latypov, N. S. Perminov, K. V. Petrovnin, O. N. Sherstyukov, Multi-Resonator Quantum Memory, *Phys. Rev.A.*, vol. 95, no.1, 012338, 2017.

4. Narkis M. Arslanov, Ali A. Kamli, Sergey A. Moiseev, A transversely localized light in waveguide: the analytical solution and its potential application, *Laser Physics* vol. 27, 025103, (2017).

5. N. S. Perminov, R. S. Kirillov, R. R. Latypov, S. A. Moiseev and O. N. Sherstyukov, Optimal conditions of quantum memory for spatial frequency grating of resonators, *Bulletin of RAS: Physics*, Vol. 81, N. 5, 2017.

6. N.M. Arslanov and S.A. Moiseev, Optimal periodic frequency combs for high-efficiency optical quantum memory based on rare-earth ion crystals, *Quantum Electronics*, V.47, no. 9, p. 783, 2017.

7. K. I. Gerasimov, S. A. Moiseev, V. I. Morosov, and R. B. Zaripov, Room temperature storage of electromagnetic pulses on a high-finesse natural spin-frequency comb, *Phys. Rev. A*, vol. 90, no.4, 042306, 2014.