

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Романовой Елены Анатольевны
на диссертационную работу Анашкиной Елены Александровны
«Управление нелинейно-оптическими и лазерными процессами в волокнах и
микрорезонаторах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Проблема создания компактных, дешевых и надежных источников лазерного излучения в ближнем и среднем ИК диапазонах является одной из ключевых в лазерной физике. Актуальность решения этой проблемы обусловлена, прежде всего, ускоренным развитием информационных технологий. В телекоммуникационных сетях в настоящее время используются оптоэлектронные устройства, включающие линейки лазерных диодов и модули для спектрального уплотнения каналов в ближнем ИК диапазоне. Для создания многоканальных систем и повышения пропускной способности сети представляются перспективными разработки оптических источников частотных гребенок в рабочих диапазонах волоконно-оптических линий связи. Лазерные источники среднего ИК диапазона востребованы в информационно-сенсорных спектроскопических системах для применений в промышленности, медицине, экологическом мониторинге. В частности, функционирование волоконно-оптических спектроскопических сенсоров на базе Фурье-спектрометров с тепловыми источниками уже неоднократно продемонстрировано в лабораториях, но для создания средств дистанционного химического анализа различных сред в реальном времени нужны волоконные широкополосные источники излучения среднего ИК диапазона.

Объектом исследования Е.А.Анашкиной являются волоконные световоды и микрорезонаторы на основе оптических волокон (микросферы на торце волокна) из кварцевого стекла, а также из теллуридных и халькогенидных стекол, имеющих спектральные окна с малыми оптическими потерями в ближнем и среднем ИК. Поскольку в таких структурах оптическое излучение может быть локализовано в пространственных областях с микронными и субмикронными размерами, их использование в качестве компактных, дешевых и эффективных устройств нелинейной оптики и лазерной физики привлекает внимание исследователей на протяжении последних десятилетий. Разработаны технологии создания стекол и световодов с низкими оптическими потерями, а микросферы на торце волокна имеют рекордно высокую добротность среди всех видов оптических микрорезонаторов. Хорошо развита теория распространения электромагнитных волн в таких структурах, что позволяет проводить вычислительные эксперименты в компьютерных моделях. В частности, для описания нелинейно-оптических явлений в волоконных световодах традиционно используется численное решение обобщенного нелинейного уравнения

Шредингера, а в микрорезонаторах – решение уравнения Луджиато-Лефевра. Для экспериментальных исследований в ближнем ИК имеются непрерывные и импульсные лазеры для накачки, а также измерительная аппаратура. Все это послужило основой для значительного прогресса в управляемом преобразовании оптического излучения в кварцевых световодах и микрорезонаторах как устройствах нелинейной оптики и лазерной физики ближнего ИК диапазона. Создание аналогичных устройств для среднего ИК диапазона затрудняется тем, что оптические стекла с малыми оптическими потерями в этой области имеют нули дисперсии групповой скорости (ДГС) на длинах волн несколько больше 2 мкм (теллуритные) и свыше 4.5 мкм (халькогенидные), а лазерные источники накачки в этих диапазонах не соответствуют требованиям компактности, дешевизны и надежности. В стеклах, легированных ионами редкоземельных элементов (РЗЭ), энергетические состояния ионов зависят от особенностей матрицы стекла, и в случае теллуритных и халькогенидных стекол имеются определенные проблемы, препятствующие созданию волоконных лазеров среднего ИК диапазона. Наконец, для работы в этом диапазоне нужна измерительная аппаратура, отсутствие которой тормозит экспериментальные исследования.

Все вышеперечисленное, на мой взгляд, определяет актуальность и практическую значимость диссертационной работы Елены Александровны Анашкиной, в которой четко сформулирована цель работы и поставлены задачи, направленные на получение фундаментальных знаний о характере нелинейно-оптических и лазерных процессов в волоконно-оптических устройствах, функционирующих в ближнем и среднем ИК диапазонах.

Диссертация, оформленная в виде научного доклада, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и списка научных публикаций, в которых изложены основные научные результаты диссертации – 35 статей в рецензируемых журналах первого и второго квартилей Q1 и Q2 по международной базе данных Scopus.

Во введении обсуждается актуальность и степень разработанности выбранной темы, формулируются цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, приводятся сведения о новизне полученных результатов, достоверности и практической значимости работы, а также краткое описание методологии и методов исследования. Отмечается недостаточность фундаментальных знаний по теме работы и важность проведения детальных теоретических исследований для достижения поставленной цели. Основным методом теоретических исследований является компьютерное моделирование на основе известных подходов, хорошо апробированных в лазерной физике и нелинейной оптике волоконных световодов. В разработках лазерных систем и нелинейно-оптических преобразователей для среднего ИК диапазона основное внимание в диссертации уделяется применению стандартных и недорогих источников накачки в ближнем ИК диапазоне. Этим отчасти обосновывается выбор волоконно-оптических структур (световоды и микрорезонаторы) как

объектов исследования, поскольку волноводная дисперсия мод этих структур дает существенный вклад в полную дисперсию и может выступать в роли параметра управления излучением. Методы и подходы, выбранные на основе анализа современного состояния исследований по данной теме, являются научно обоснованными и согласуются с задачами диссертационной работы.

В первой главе диссертации со ссылками на статьи А2-А8 представлены результаты исследований по задаче о разработке новых источников оптического излучения, как непрерывного, так и импульсного, в диапазоне длин волн более 2 мкм, на основе световодов из теллуритного стекла: легированных ионами РЗЭ, а также нелегированных микроструктурированных.

Для активных световодов акцент сделан на получение широкополосного лазерного усиления и увеличение мощности лазерных источников. Сложности в решении такой задачи связаны с особенностями энергетических состояний ионов РЗЭ в матрице теллуритного стекла. С одной стороны, низкая энергия фононов позволяет получать генерацию на тех излучательных переходах ионов РЗЭ, которые «не работают» в матрице кварцевого стекла. Однако, для иона тулия генерацию на длине волны 2.3 мкм можно получить только при каскадном усилении совместно с генерацией на длине волны 1.9 мкм. В работе проведено численное моделирование усиления в такой схеме и проведена оптимизация по мощности и направлению излучения непрерывной накачки, а также по длине активного волокна. Достоверность полученных результатов подтверждается согласием с результатами эксперимента, в котором при мощности накачки менее 3 Вт на длине волны 2.3 мкм получена низкая выходная мощность менее 1.5 мВт. В расчетах показано, что при оптимизации компонентов схемы и при мощности накачки 10 Вт на этой длине волны возможно получение выходной мощности 1 Вт. Для теллуритного волокна, легированного ионами эрбия, также исследована непрерывная каскадная генерация на длинах волн 2.8 мкм и 1.55 мкм, причем, в теоретической модели для управления инверсией дополнительно рассмотрена накачка на двух длинах волн 0.98 и 1.7 мкм, которая позволяет увеличить мощность генерируемого непрерывного излучения на длинах волн 2.7-2.8 мкм до 80 мВт.

Управление спектральными характеристиками лазерного импульса исследовано теоретически как в задаче импульсной генерации на длине волны 2.7 мкм в световоде, легированном ионами эрбия, так и в задаче распространения солитонов в микроструктурированных теллуритных волокнах. Проведен детальный анализ спектральных зависимостей коэффициента дисперсии и нелинейного коэффициента. В компьютерной модели, откалиброванной по результатам измерений и основанной на решении нелинейного волнового уравнения с учетом керровской нелинейности и комбинационного рассеяния, получена перестройка пиковой длины волны рамановских солитонов от 2 мкм до > 4 мкм.

Во второй главе со ссылками на статьи A10 – A15 представлены результаты исследований по задаче о разработке новых источников широкополосного оптического излучения в диапазоне длин волн более 2 мкм на основе световодов из халькогенидного стекла. Для получения спектрального суперконтинуума в нелегированных световодах используется стандартный подход, заключающийся в подборе структуры с требуемыми дисперсионными характеристиками и моделировании распространения импульса путем численного решения обобщенного нелинейного уравнения Шредингера. В данной работе этот подход впервые применен к исследованию уширения спектра импульса при его распространении в халькогенидном волокне с сердцевиной из стекла системы As-Se-Te с разным содержанием теллура и оболочкой из сульфида мышьяка. Состав стекла As-Se-Te и диаметр сердцевины подбирались из условия оптимального сдвига нуля дисперсии в коротковолновую область. В компьютерной модели получена генерация суперконтинуума в диапазоне длин волн 1-8 мкм при накачке 100 фс импульсом на длине волны 2 мкм. Аналогичное исследование проведено для световода с подвешенной сердцевиной из селенида мышьяка. Поскольку для получения требуемой дисперсионной характеристики сердцевина должна быть тонкой, в работе рассматривается биконусная перетяжка длиной 1.5 см и с изменением диаметра от 10 мкм до 1 мкм. Расчет нелинейно-оптических преобразований проводился в адиабатическом приближении для основной моды световода без учета взаимодействия мод в нерегулярной структуре и радиационных потерь. В этом приближении на выходе из такой структуры при накачке 100 фс импульсом на длине волны 2 мкм получен спектральный суперконтинуум в диапазоне длин волн 1-10 мкм.

Для волокна из стекла системы Ge-As-Ga-Se, легированного ионами P3Э, в численной модели исследовано усиление ультракоротких импульсов в диапазоне длин волн 4 – 5 мкм при непрерывной накачке в оболочку волокна в ближнем ИК. Проведен вычислительный эксперимент и определены режимы усиления для каждого из рассмотренных активаторов (празеодим, тербий и диспрозий).

Таким образом, результаты, изложенные в главах 1 и 2, подтверждают выполнение заявленной первой задачи диссертационной работы.

В третьей главе со ссылками на статьи A32-A35 представлено описание разработанного Е.А. Анашкиной метода характеристики ультракоротких лазерных импульсов. Эти результаты также можно рассматривать как своего рода апробацию компьютерных моделей и алгоритмов, которые использованы автором в главах 1 и 2, поскольку разработанный метод основан на нелинейно-оптическом преобразовании импульса в среде с кубической нелинейностью, каковой в данной работе является отрезок кварцевого световода. Моделирование распространения импульса в световоде в совокупности с итерационным алгоритмом позволяет восстановить огибающую и фазу лазерного импульса. Проведена

апробация метода в вычислительных экспериментах с разными видами оптических волокон, результаты подтверждены независимыми измерениями методом SHG FROG. Несомненным преимуществом разработанного метода по сравнению с другими для исследований в волоконно-оптических устройствах является возможность характеризовать низкоэнергетические импульсы без ограничения на их спектральную ширину. Эти результаты подтверждают выполнение третьей заявленной задачи диссертационной работы.

В четвертой главе со ссылками на статьи A17-A20, A24-A28 представлены результаты исследований по задаче о получении лазерного излучения и генерации частотных гребенок в ближнем и среднем ИК диапазонах в оптических микросферах, которые изготавливаются методом контролируемого нагрева торца оптического волокна. Это сравнительно простая технология, а микросфера с волоконным элементом связи является более гибкой системой в сравнении с интегрально-оптическими структурами. Микросферы на торце волокна имеют рекордно высокую добротность, поскольку на расплавленном торце силами поверхностного натяжения формируется идеально гладкая поверхность сферы. В отношении нелинейно-оптических явлений сферические резонаторы отличает следующая особенность: при уменьшении диаметра сферы нуль ДГС моды резонатора смещается в длинноволновую область. Это существенно при разработке источников излучения среднего ИК диапазона, поскольку нули ДГС халькогенидных и теллуридных стекол приходится на область длин волн более 2 мкм, и для накачки источниками в ближнем ИК надо компенсировать нормальную дисперсию стекла дисперсией мод структуры. В случае волоконного световода для этого надо уменьшить диаметр сердцевины, а в случае микросферы при уменьшении диаметра дисперсия моды будет сдвигать нуль ДГС в длинноволновую область. Для получения требуемой дисперсионной характеристики вместо сплошных сфер используют полые.

Для сплошных кварцевых микросфер в работе выявлены новые режимы генерации частотных гребенок, которым соответствуют солитонные решения уравнения Луджиато-Лефевра в области аномальной ДГС мод микросферы. Эти режимы получены при накачке в ближнем ИК диапазоне в области нормальной ДГС. В микросферах из сульфида мышьяка получена рамановская генерация в ближнем ИК и установлено, что она является одномодовой, что реализовано впервые. Эти результаты можно рассматривать и как апробацию используемых теоретических моделей, что было бы весьма затруднительно в области среднего ИК. Результаты решения уравнения Луджиато-Лефевра в среднем ИК для мод полых сфер из теллуридного и халькогенидного стекла указывают на возможность получения здесь солитонных частотных гребенок.

Поскольку в микросферах даже малого диаметра обычно возбуждается много мод разных радиальных порядков, для решения задачи лазерной генерации в сферах, легированных РЗЭ, в строгой постановке надо решить систему большого числа обыкновенных

дифференциальных уравнений. Вместо этого автор диссертационной работы применяет метод последовательных приближений и сводит стационарную задачу к решению алгебраических или детерминантных уравнений для заселенности верхнего уровня (статьи A29-A31). Разработанная численная модель позволила исследовать разные режимы лазерной генерации в теллуридных микросферах, легированных ионами тулия и эрбия. Для апробации численной модели проводилось сравнение с решением системы алгебраических уравнений методом Рунге-Кутты, а полученные режимы лазерной генерации сравнивались с экспериментальными данными, известными из литературы.

Особый интерес представляет часть главы 4 со ссылками на статьи A21-A23, в которой рассматривается применение микросфер как устройств оптоэлектроники для уплотнения каналов в информационных сетях. В расчетах показано, что в рабочих диапазонах волоконно-оптических линий связи возможно получение частотных гребенок, соответствующих техническим стандартам ITU-T. В программе VPI photonics проведен вычислительный эксперимент по передаче данных в 4-х канальной системе и установлено соответствие стандартам телекоммуникационных сетей со спектральным мультиплексированием.

Результаты, изложенные в главе 4, подтверждают выполнение заявленной второй задачи диссертационной работы.

В заключении изложены основные результаты выполненного исследования, а также рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

На основе анализа содержания глав диссертации и статей в списке работ автора можно сделать вывод о том, что описание глав диссертационной работы полностью соответствует содержанию статей, на которые ссылается автор в каждой главе. Научные положения, выносимые на защиту, обоснованы и отражают основные выводы, сделанные в диссертации в результате проведенных исследований. Широкий спектр изучаемых явлений, разнообразие численных методов, используемых в компьютерных моделях, публикации в высокорейтинговых журналах подтверждают высокую квалификацию автора диссертационной работы.

Замечания по содержанию диссертационной работы:

- 1) В тексте диссертации недостаточно внимания уделено анализу волноводных свойств рассматриваемых структур: нет информации о числе мод световода в заданном спектральном интервале, об отсечках мод и области одномодового режима при том, что такая информация имеется в соответствующих статьях.
- 2) В работе рассматривается нерегулярная волноводная структура в виде биконусного световода с перетяжкой. Поскольку халькогенидный световод с сердцевинной диаметром 10 мкм, находящейся в воздухе, является многомодовым, в сужающемся до 1 мкм конусном

переходе длиной 0.5 см происходят значительные радиационные потери мощности, причем, моды световода начинают взаимодействовать друг с другом и обмениваться энергией. В волокне с подвешенной сердцевинной излучение из сердцевины может сформировать моды, бегущие на некоторой конечной длине по воздушной оболочке. Эти эффекты не учитывались в компьютерной модели и не обсуждались в диссертационной работе. Между тем, вклад этих эффектов может существенно изменить характер нелинейно-оптических преобразований.

3) В тексте диссертации нет информации о том, как в расчетах задавалась спектральная зависимость показателя преломления для исследуемых составов теллуридных и халькогенидных стекол в заданном спектральном диапазоне. Не указано, как определялись значения керровской постоянной для разных составов.

4) В работе утверждается, что режимы генерации гребенок с солитоноподобными спектрами в кварцевых микросферах (рис.14) отличаются от известных режимов. Не указано, в чем, по существу, состоят эти отличия.

5) В описании метода характеристики ультракоротких импульсов не обсуждается вклад радиационных потерь в световоде. В отличие от тонких пленок, при вводе излучения в световод возникают радиационные потери вследствие несогласованности пространственного профиля лазерного импульса и профиля моды световода. Кроме того, в схеме с двумя отрезками световода условия ввода в первый и второй отрезки не являются идентичными. Далее, при моделировании обратного распространения используются результаты измерений, вклад в которые дают и радиационные потери. Если эти потери не учитываются в вычислительном алгоритме, параметры импульса воспроизводятся недостаточно точно.

6) В работе используются выражения «дисперсия волокна», «дисперсионные характеристики волокон» и «ZDW волокна» что некорректно, поскольку дисперсионные характеристики определяются для электромагнитных волн - мод волокна.

7) Согласно общепринятым обозначениям [Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов], фундаментальной модой световода со ступенчатым профилем показателя преломления является мода HE_{11} , а не EH_{11} , как утверждается в работе.

Замечания по оформлению диссертационной работы:

1) На рисунках результаты моделирования и измерений показаны на разных графиках, что неудобно для сравнения. Отсутствие количественного сравнения результатов вычислительного и натурального эксперимента не позволяет сделать выводы о роли тех явлений, которые не учитывались в компьютерной модели.

2) В тексте диссертации некоторые из приведенных параметров не определены (γ , β на рис.16).

3) В тексте имеется небольшое количество опечаток.

4) В тексте имеются нарушения употребления известных терминов. Так, вместо «нормальная область дисперсии» должно быть «область нормальной дисперсии», вместо «набег нелинейной фазы» - «нелинейный набег фазы».

Переходя к итоговой оценке, хочу отметить, что высказанные в отзыве некоторые критические замечания не снижают общего положительного впечатления от результатов диссертационной работы, которые, как и защищаемые положения, обладают несомненной научной новизной, достоверны, и вносят существенный вклад в развитие лазерной физики и нелинейной оптики. Результаты проведенного исследования показывают, что Е.А.Анашкиной создана мощная теоретическая база для исследований в этих областях, что, при наличии экспериментального и технологического оборудования в коллективе автора, является основой для получения в перспективе выдающихся научных результатов мирового уровня.

Диссертационная работа Анашкиной Е.А. «Управление нелинейно-оптическими и лазерными процессами в волокнах и микрорезонаторах» представляет собой завершенное научное исследование и удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 11.09.2021), а ее автор Анашкина Елена Александровна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры
общей, теоретической и компьютерной физики Саратовского
национального исследовательского государственного
университета имени Н.Г. Чернышевского

Романова Елена Анатольевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Почтовый адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

E-mail: romanovaelena@sgu.ru Телефон: 8(8452)511427

Согласна на обработку персональных данных



Список основных публикаций Романовой Елены Анатольевны по теме диссертации в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет (не более 15)

1. D. Zhivotkov, D. Ristić, E. Romanova, M. Ivanda, Refractometric gas sensing using a whispering gallery mode microresonator coated with a supra-micron sol-gel layer, *Optical Materials* 118:111286, 2021.
2. E. Romanova, S. Korsakova, Light waves interaction with an analyte in fiber-optic sensors for mid-IR spectroscopy, *Optical and Quantum Electronics*, 53(11) 650, 2021.
3. Romanova E.A., Korsakova S.V., Rozhnev A.G., Velmuzhov A.P., Kotereva T.V., Sukhanov M.V., Shiryaev V.S. Chalcogenide fiber loop probe for the mid-IR spectroscopy of oil products, *Optics Express*, 28(4) 5267, 2020.
4. Корсакова С.В., Романова Е.А. Особенности математического моделирования световых полей в сенсорном элементе для волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика.* В.1, 55, 2020.
5. Корсакова С.В., Виноградова Е.А., Романова Е.А., Ширяев В.С., Использование высших мод халькогенидных световодов для оптимизации метода эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона, *Письма в ЖТФ* 45(10) 17, 2019.
6. Е.А. Романова, Ю.С. Кузюткина, В.С. Ширяев, С. Гизар, Исследование динамики нелинейного оптического отклика в стеклообразных халькогенидных полупроводниках методом «накачка-зондирование», *Квантовая электроника*, 48(3) 228, 2018.
7. Корсакова С.В., Романова Е.А., Вельмузов А.П., Котерева Т.В., Суханов М.В., Ширяев В.С., Исследование характеристик сенсорных элементов для волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона, *Оптика и Спектроскопия*, 125(9) 402, 2018.
8. Elena Romanova, Yulia Kuzyutkina, Vladimir Shiryaev, Nabil Abdel-Moneim, David Furniss, Trevor Benson, Angela Seddon, Stephane Guizard, Measurement of non-linear optical coefficients of chalcogenide glasses near the fundamental absorption band edge, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 480, 13, 2018.
9. Svetlana Korsakova, Elena Romanova, Alexander Velmuzhov, Tatiana Kotereva, Maksim Sukhanov, Vladimir Shiryaev, Peculiarities of the mid-infrared evanescent wave spectroscopy based on multimode chalcogenide fibers, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 475, 38, 2017.