

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Федотова Андрея Борисовича на соискание ученой степени доктора физико-математических наук «Спектрально-временные преобразования лазерных импульсов в микроструктурированных световодах для нелинейно-оптической спектроскопии» по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Представленная диссертационная работа А.Б. Федотова посвящена исследованиям нелинейно-оптических преобразований в новых типах оптических световодов – микроструктурированных (фотонно-кристаллических) волокнах. Эта тематика вызывает большое внимание исследователей, начиная с конца прошлого века, что связано с отличительными особенностями данного типа световодов, прежде всего, с их высокой нелинейностью и возможностью управления дисперсией в пределах, недостижимых для стандартных телекоммуникационных волокон. В диссертации, носящий, главным образом, экспериментальный характер, рассматриваются различные режимы спектрально временных преобразований импульсов в микроструктурированных световодах, а также практическое применение получаемых перестраиваемых по длине волны импульсов для целей спектроскопии и квантовой оптики. В работе содержится разнообразный материал, который отражает современный уровень работ в области волоконной нелинейной оптики, и в целом можно сказать, что работа является актуальной.

Диссертационная работа А.Б. Федотова содержит введение, пять глав, список публикаций автора по диссертационной работе и список цитируемых работ. Во введении содержатся сведения о целях и задачах диссертации, практической значимости и новизне полученных результатов, представлены защищаемые положения и дается краткая информация о структуре диссертации. Общий объем диссертации 251 страница, работа содержит 94 рисунка и одну таблицу. Автореферат правильно и достаточно полно отражает материалы диссертации.

Диссертационная работа представляет результаты, полученные автором в течение длительного времени (начиная с 2000 года). В **первой главе** представлены основные физические свойства и отличительные особенности микроструктурированных световодов, а также особенности их применений для различных задач современной лазерной физики и нелинейной оптики. Выделяются два основных класса микроструктурированных волокон - с твердотельной и поллой сердцевиной, рассматриваются особенности волноводного распространения излучения в этих типах световодов, а также их области применения. Работа является экспериментальной, однако в диссертации определенное внимание уделяется теоретическому моделированию и численному анализу результатов. В первой главе кратко представлены основные методики расчета дисперсионных и нелинейных свойств волокон, а также результаты моделирования распространения лазерных импульсов на основе решения обобщенного нелинейного уравнения Шредингера

(ОНУШ). Во **второй главе** представлена экспериментальная техника. Достаточно кратко автор описывает многообразие лазерных систем с различными энергиями и длинами волн импульсов, а также длительностями от десятков фемтосекунд до единиц наносекунд. Такое разнообразие использованной экспериментальной техники является характерным для работы, и во многом определяет достаточно сильно различающиеся направления представленных результатов. Здесь же приведено описание используемых волокон и методик их изготовления. Также в главе описаны основные методики характеристики параметров лазерных импульсов. Наличие современной измерительной техники и оригинальных методик характеристики параметров сверхкоротких лазерных импульсов определяет достоверность представленных результатов.

В **третьей главе** представлены результаты по получению перестраиваемых фемтосекундных импульсов в ближней инфракрасной области спектра с помощью микроструктурированных волокон. Наряду с техникой параметрической генерации и усиления нелинейно-оптические преобразования в микроструктурированных волокнах представляются относительно недорогой и технологичной схемой получения перестраиваемых по длине волны фемтосекундных импульсов в широком спектральном диапазоне. В качестве базового физического механизма формирования перестраиваемых импульсов выступают солитонные явления, которые определяются необходимостью поддержания режима аномальной дисперсии групповых скоростей. Отличительной особенностью отраженных в этой части диссертации исследований является использование излучения хром-форстеритовых лазерных систем с центральной длиной волны 1.25 мкм для оптической накачки, что позволяет использовать микроструктурированные волокна с большими размерами сердцевины, при этом поддерживая аномальную дисперсию групповых скоростей (ДГС) и возможность формирования солитонов, а также их спектральное смещение за счет явления солитонного самосдвига частоты (ССЧ). Автором представлены результаты с использованием кварцевых волокон с диаметром сердцевины от 5 до 50 мкм, где процессы нелинейно-оптического преобразования различаются физическими механизмами, модовым составом, энергиями и пиковыми мощностями импульсов. Отмеченное разнообразие лазерных систем позволяет сдвигать длину волны накачки относительно 1.25 мкм, что позволяет наблюдать режимы спектрального уширения и перестройки импульсов накачки как в режиме нормальной, так и аномальной ДГС за счет солитонного самосдвига частоты (ССЧ). Очень важным является то, что в работе представлено не только измерение спектральных характеристик формируемых импульсов, но и тщательно проведены измерения их временных характеристик. Представлен ряд методов, позволяющих активно управлять спектрально временными характеристиками. Генерация импульсов с мультимегаваттными пиковыми мощностями возможна при использовании МС волокон с большой площадью сердцевины ($> 100 \text{ мкм}^2$). Дисперсионные свойства таких волокон близки к материальной дисперсии кварца, но использование излучения накачки с длиной

волны в области 1.25 мкм позволяет реализовать режимы распространения с аномальной дисперсией, что приводит к формированию мощных солитонов и генерации суперконтинуума. С использованием внешнего компрессора это излучение можно сжать до длительностей в несколько циклов поля и пиковыми мощностями до десятков мегаватт. Здесь же продемонстрированы связанные с особенностями распространения высокоэнергетических импульсов процессы самофокусировки и появления высших волноводных мод, ограничивающие масштабы спектрального уширения и солитонного самосдвига частоты. Экспериментальные результаты подтверждались теоретическим анализом и численным моделированием, что заметно повышает достоверность и значимость полученных результатов. Например, экспериментальная реализация режима множественной генерации солитонов с гладкой спектральной фазой, позволила теоретически предсказать возможность их когерентного сложения и формирования импульсов длительностью в несколько циклов поля. Очень интересные результаты связаны с возможностью наноструктурирования сердцевины волокон, использования световодов, изготовленных из не кварцевых материалов, что позволяет управлять волноводной дисперсией и генерировать новые спектральные компоненты в видимой области, что в целом позволяет говорить о практической значимости представленных результатов.

В четвертой главе результаты связаны с использованием полых фотонно-кристаллических волокон с очень разнообразной структурой. Первый параграф, судя по публикациям, представляет данные, полученные на ранних этапах исследований. Эти результаты позволяют говорить об эффективном использовании полых фотонно-кристаллических световодов для целей транспортировки мощных лазерных импульсов нано-, пико- и фемтосекундной длительности. При этом для фемтосекундных импульсов были продемонстрированы режимы транспортировки с мегаваттными уровнями пиковых мощностей, поддерживающих длительность на фемтосекундном уровне за счет солитонного режима или компрессии предварительно chirпированных импульсов с мегаваттными уровнями пиковых мощностей. Было продемонстрировано использование этих импульсов для биомедицинских приложений, в частности, для лазерного разрушения живых тканей. Наиболее современные результаты содержатся во втором параграфе и представляют собой вопросы распространения фемтосекундных импульсов ближнего и среднего инфракрасного диапазонов в полых антирезонансных фотонно-кристаллических волокнах, заполненных инертным газом при высоком давлении. В экспериментах использовались две лазерные системы. Первая – иттербиевая (импульсы среднего инфракрасного диапазона в области 3.5 мкм), а вторая на основе кристалла титаната с сапфиром, включающая регенеративный и оптический параметрические усилители (импульсы ближнего инфракрасного спектра около 2 мкм). Эти импульсы фокусировались в сердцевину заполненных инертным газом полых антирезонансных волокон револьверного типа, где при своем распространении испытывали мультиоктавное уширение за счет фазовой

само модуляции, а затем сжатие до длительностей порядка одного цикла поля. В настоящее время не так много научных групп обладают техникой получения и характеристики однопериодных импульсов. Представленное подробное описание условий экспериментов и измерения временных, спектральных и фазовых характеристик импульсов отражает высокий уровень экспериментальной техники и достоверность результатов. В работе представлена возможность генерации импульсов с длительностями менее одного цикла поля и с пиковыми мощностями, достигающими до нескольких гигаватт. Безусловно, это очень впечатляющий результат.

Пятая глава посвящена разнообразным применениям микроструктурированных (фотонно-кристаллических) волокон. В частности, большое внимание уделяется спектроскопическим приложениям. В первых двух параграфах главы описываются эксперименты по использованию полых фотонно-кристаллических волокон в качестве сенсорных устройств для целей повышения эффективности газового анализа за счет увеличения длины взаимодействия импульсов в процессе четырехволнового взаимодействия на основе когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). Потенциальная эффективность газового анализа была многократно повышена относительно режима жесткой фокусировки. Также рассмотрено влияние материала сердцевины на форму спектральной линии антистоксова сигнала. Центральная часть главы представляет использование микроструктурированных волокон в качестве элементов, генерирующих перестраиваемые импульсы для целей КАРС-спектроскопии и микроспектроскопии. Были использованы волокна и подходы, которые описаны в третьей главе. Наиболее интересные результаты связаны с возможностью применения импульсов с мегагерцовой частотой повторения от хром-форстеритовых генераторов. Использование этих перестраиваемых импульсов (за счет солитонного самосдвига частоты) в инфракрасной и видимой областях было продемонстрировано в экспериментах по сканирующей КАРС-микроскопии твердых тел (кристаллического кремния и искусственных алмазных пленок) и тканей головного мозга лабораторных животных. В конце главы представлены интересные результаты по генерации фотонных пар в фотонно-кристаллических волокнах с высокой нелинейностью. Продemonстрировано, что свойства фотонно-кристаллических волокон позволяют в процессе векторного спонтанного четырехволнового взаимодействия формировать квантовые состояния света с широким спектром параметров: высокой эффективностью и яркостью фотонных пар до 10^6 МГц, различными степенями перепутанности, корреляционными свойствами (в частности, продемонстрирован режим генерации одиночных провозглашённых фотонов), высокой спектральной шириной. Интересным приложением является использования подобных перепутанных фотонных пар для целей квантовой спектроскопии линейного поглощения, что имеет определенные преимущества в сравнении с «классическими» методами измерения.

Научная группа МГУ имени М.В. Ломоносова, где работает соискатель, имеет высокую активность в области нелинейно-оптических преобразований в микроструктурированных волокнах, и вклад А.Б. Федотова является заметным и заслуженным. Это отражается в большом количестве публикаций (96 статей в рецензируемых журналах) по тематике диссертации. Выводы и положения, сформулированные в диссертации, в целом обоснованы. Экспериментальные результаты получены на современном оборудовании, что, в частности, подтверждает их достоверность, научную новизну и практическую значимость. Необходимо отметить большое разнообразие результатов, что прежде всего связано с различными структурами использованных микроструктурированных волокон (с полостью и сплошной сердцевиной), а также с областями их применения (в качестве сенсоров, источников импульсов для микроскопии и квантовой оптики).

В работе содержится большое количество результатов, связанных с нелинейно-оптическими преобразованиями лазерных импульсов в микроструктурированных световодах и их применениями для спектроскопических целей. Хотелось бы отметить несколько отличительных и важных результатов диссертационной работы. Думаю, в первую очередь можно отметить наиболее «современные» результаты, посвященные генерации предельно коротких импульсов. Такие импульсы представляют интерес для генерации одиночных аттосекундных импульсов, для исследования возможности формирования предельно коротких импульсов тока в диэлектрических и полупроводниковых материалах, для реализации оптоэлектронных устройств на петагерцовой шкале, а также для решения многих задач современной физики. Очень интересными и современными являются результаты, связанные с генерацией квантовых состояний света. Очевидно, что волоконный формат генерации коррелированных одиночных фотонных пар имеет заманчивое потенциальное применение для квантовых телекоммуникационных приложений (в этом отношении важным является демонстрация получения фотонных пар не только с импульсными источниками накачки, но и непрерывными, что повышает технологичность предложенного подхода). В то же время использование солитонных режимов преобразования лазерных импульсов накачки от хром-форстеритовых систем для получения перестраиваемых фемтосекундных импульсов в ближней инфракрасной и видимой областях спектра также имеет разнообразные приложения и высокий потенциал их использования, чему была посвящена значительная часть пятой главы. Реализованная схема представляется относительно несложной и недорогой, а разнообразие характеристик формируемых импульсов обеспечивает широкий спектр их приложений. Таким образом, еще раз подчеркну, что результаты диссертационной работы имеют не только важное научное значение, но и могут быть широко использованы в различных областях современной лазерной физики.

Вместе с тем, необходимо отметить ряд замечаний, возникших при анализе диссертационной работы.

Конечно, главными для диссертанта были экспериментальные исследования, тогда как теории посвящена лишь небольшая, возможно чрезмерно, часть первой главы и небольшие отрывки в других главах. Но при этом в основном для моделирования распространения импульсов уравнении 1.8 (стр. 48 диссертации), видимо, допущены опечатки. Об этом можно судить уже по первой строке уравнения, так как член потерь α из-за наличия как сомножителя мнимой единицы в уравнении описывает не потери, а дополнительный фазовый набег (из предыдущего текста следует, что α – величина вещественная). Далее, для применимости подобного уравнения однонаправленного приближения к случаю малопериодных, а тем более полупериодных импульсов необходимо, как минимум, убедиться в том, что это уравнение не противоречит уравнениям Максвелла и следствиям из них. Важным же точным следствием уравнений Максвелла в принятом одномерном варианте является сохранение при распространении электрической площади импульса – интеграла от электрической напряженности по времени за всю длительность импульса. В литературе этому вопросу посвящен ряд свежих публикаций. У рецензента создалось впечатление, что указанному следствию уравнений Максвелла уравнение (1.8) для предельно коротких импульсов не удовлетворяет. Это может ограничить область применимости (1.8) случаем не столь коротких импульсов.

В третьей главе диссертации достаточно подробно изложены процедуры и результаты экспериментальной характеристики импульсов накачки от хром-форстеритовых лазерных систем и солитонных импульсов. В частности, представлены измерения длительностей этих импульсов автокорреляционной техникой и методиками на основе XFROG. В то же время в работе нет информации о длительностях импульсов, получаемых в видимой области спектра. В параграфе 3.3 приведены графики спектров, но не приведены измерения длительности.

В двух первых параграфах пятой главы рассмотрено функционирование полых фотонно-кристаллических волокон в качестве элементов для газового анализа на основе нелинейно-оптической КАРС спектроскопии. Отмечается, что повышение эффективности четырехволновых процессов относительно режима жесткой фокусировки может достигать нескольких порядков. Однако при реализации экспериментов увеличение эффективности достигало только одного порядка, что связывалось с «неидеальностью» использованных полых световодов. К сожалению, в работе не предоставлены данные о дальнейших практических реальных приложениях подобных волоконных сенсоров.

Однако, указанные замечания не снижают научной значимости представленных в диссертационной работе результатов. Диссертация А.Б. Федотова отвечает требованиям к диссертациям, установленным МГУ имени М.В.Ломоносова, и критериям, определенным п.п. 2.1 – 2.5 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В.Ломоносова. Диссертационная работы правильно оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук МГУ имени М.В.Ломоносова.

Диссертация А.Б. Федотова «Спектрально-временные преобразования лазерных импульсов в микроструктурированных световодах для нелинейно-оптической спектроскопии» является законченным научным исследованием и соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика (по физико-математическим наукам), а сам соискатель Федотов Андрей Борисович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. «лазерная физика».

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН
ФГБУН Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе
Российской академии наук, лаборатория атомной радиоспектроскопии,
главный научный сотрудник

Николай Николаевич Розанов

16.12.2024

Контактные данные:

тел.: _____, e-mail: nnrosanov@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 01.04.06 – Оптика

Адрес места работы:

194021, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Лаборатория атомной
спектроскопии.

Тел.: (812)297-1017; e-mail: post@mail.ioffe.ru