

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

Диссертационная работа А.Б.Федотова посвящена вопросам исследования и использования микроструктурированных волокон для спектроскопических приложений, сенсорики и квантовой оптики.

Актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений. Повышение эффективности нелинейно-оптических преобразований является одним из ключевых вопросов современной лазерной физики, дает возможность расширить спектральный диапазон генерации лазерного излучения относительно наиболее распространенных фемтосекундных лазеров, прежде всего, на основе титан-сапфировых кристаллов. Эти лазерные системы позволяют получать импульсы с замечательными характеристиками в области, близкой к центральной длине волны генерации 800 нм. Поэтому расширение области перестройки в инфракрасный диапазон играет важное как научное, так и технологическое значение. Кроме того, только на основе нелинейно-оптических эффектов возможна генерация очень коротких импульсов, в том числе аттосекундной длительности. Использование волоконных технологий позволяет во многих случаях повысить эффективность нелинейно-оптических преобразований. При этом активно развиваются решения на основе фотонно-кристаллических (микроструктурированных) световодов. Цель диссертационной работы как раз и состоит в комплексном исследовании особенностей нелинейно-оптического преобразования в различных типах микроструктурированных (фотонно-кристаллических) световодов, а также в демонстрации эффективного применения формируемого за счет этого излучения в задачах спектроскопии, микроскопии и квантовой оптики.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 251 страницу машинописного текста, включая 94 рисунка и 1 таблицу, список публикаций автора по теме диссертации из 96 наименований и список цитируемой литературы из 438 наименований.

Во введении изложены цели и задачи диссертационной работы, защищаемые положения, сведения о новизне полученных результатов и их практической значимости.

Первая глава затрагивает вопросы, связанные с основными оптическими свойствами и принципами волноводного распространения излучения в микроструктурированных волокнах. Здесь представлены основные физические механизмы, приводящие к радикальному увеличению эффективности нелинейно-оптических процессов в микроструктурированных волокнах. Особое внимание уделено генерации суперконтинуума, которому посвящен отдельный параграф. Приведены основные принципы расчета волноводных мод и особенностей распространения импульсов накачки в микроструктурированных световодах.

Во второй главе описаны лазерные комплексы, используемые в экспериментах (в основном, фемтосекундные), кратко даны их основные технические характеристики, и указаны ссылки на работы, в которых они использовались. Обсуждаются технологии изготовления микроструктурированных световодов с твердотельной и полый сердцевиной. Структура и физические параметры световодов оцениваются с помощью оптической и электронной микроскопии, а дисперсионные и нелинейные свойства – с помощью нелинейно-оптически экспериментов и численного моделирования. Представлены расчеты нахождения оптимальной структуры микроструктурированных волокон для реализации различных режимов спектрально-временного преобразования, в частности процесса спонтанного четырехволнового взаимодействия – явления, используемого для

эффективной генерации квантовых состояний света. В отдельном параграфе дается обзор используемой измерительной техники и методик характеристики особенностей спектрально-временных преобразований лазерных импульсов. Наиболее подробно рассмотрена методика характеристики предельно коротких импульсов на основе техники прямого восстановления поля методом спектральной интерферометрии (SPIDER), в частности, ее модификации, где информация о фазе поля кодируется с помощью пространственной, а не частотной карты спектральной интерференции. Большинство экспериментальных результатов, связанных со спектрально-временными преобразованиями лазерных импульсов в микроструктурированных волокнах, проверяется и анализируется с использованием результатов моделирования, в основном связанного с численным решением обобщенного нелинейного уравнения Шредингера, что безусловно повышает научную и методологическую значимость исследований. При реализации спектроскопических методов на основе когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) с использованием перестраиваемых импульсов, формируемых в микроструктурированных волокнах, большое значение уделяется соответствию их спектральных характеристик ширине возбуждаемых комбинационных резонансов. Проведенные исследования соответствуют самым современным требованиям, как с точки зрения используемой аппаратуры, так и методик проведения экспериментов и их последующего анализа.

В третьей главе основное внимание уделяется представлению солитонных механизмов распространения и нелинейно-оптического преобразования фемтосекундных импульсов накачки в микроструктурированных световодах со сплошной сердцевиной, изготовленных из различных материалов (кварца и многокомпонентного стекла). Отличительной особенностью, которой отведено заметное место в выводах и защищаемых положениях, является использование импульсов накачки в области 1.25 мкм, характерной для центральной длины волны генерации хром-форстеритовых лазерных источников. Такой выбор обеспечивает возможность солитонного режима распространения импульсов накачки для различных структур микроструктурированных световодов с диаметром сердцевины от 5 до 20 мкм, и получения перестраиваемых солитонных импульсов с кило- и мегаваттными уровнями пиковых мощностей. Отдельный параграф посвящен возможности эффективного получения перестраиваемых импульсов в видимой области спектра при накачке излучением хром-форстеритового генератора в процессе излучения дисперсионных волн или генерации третьей оптической гармоники от смещающихся по длине волны солитонных импульсов. Также в главе описаны различные методы управления спектрально-временными характеристиками импульсов, а именно представлены возможности их спектрального сжатия или, наоборот, формирования коротких импульсов с длительностью нескольких циклов поля.

В четвертой главе рассматриваются особенности распространения импульсов с длительностями от нано- до фемтосекундного диапазона в полых фотонно-кристаллических световодах. Показана возможность волоконной передачи и управления характеристиками фемтосекундных импульсов с высокими энергиями (десятки микроджоулей) и пиковой мощностью (до десятков мегаватт), достаточной для их использования в биомедицинских приложениях, в частности стоматологии и нейрохирургии. Вторая часть главы посвящена описанию физических механизмов, приводящих к генерации мультиоктавного суперконтинуума в полых антирезонансных фотонно-кристаллических световодах при накачке фемтосекундными импульсами ближнего и среднего инфракрасного диапазона. На основе экспериментальных исследований и численного моделирования представлена сложная спектрально-временная динамика импульсов накачки, которая обеспечивает формирование в режиме солитонной самокомпрессии волновых форм с длительностью менее одного цикла поля и гигаваттными уровнями пиковых мощностей.

В пятой главе продемонстрированы возможности использования различных типов микроструктурированных волокон для целей спектроскопии, микроспектроскопии и

сенсорика на основе КАРС. Продемонстрированы подходы использования полых фотонно-кристаллических световодов, заполняемых аналитом (в работе использовался атмосферный азот). Благодаря волноводному характеру взаимодействия нано и пикосекундных импульсов накачки, происходит многократное увеличение эффективности процессов нелинейно-оптического анализа на основе четырехволнового взаимодействия, в частности КАРС-спектроскопии. При этом рассмотрен интересный фактор влияния эванесцентных мод оболочки на спектр регистрируемого сигнала. Далее в нескольких параграфах продемонстрировано, что на основе микроструктурированных волноводов можно реализовать эффективную платформу для целей нелинейно-оптической биовизуализации и микроспектроскопии на основе КАРС с использованием перестраиваемых по длине волны солитонных импульсов. При этом в работе рассмотрены два подхода: с применением непосредственно инфракрасных импульсов от хром-форстеритовых лазеров и явления солитонного самосдвига частоты, а также переноса частоты этих импульсов накачки в видимую область за счет удвоения частоты в нелинейных кристаллах. Представлена методика определения границ неинвазивного воздействия фемтосекундных лазерных импульсов на биологические ткани, что достигается регистрацией коротковолнового частотного сдвига спектра КАРС, возникающего за счет ионизации и генерации свободных носителей заряда. В заключительных параграфах диссертации представлены результаты по созданию, изучению и оптимизации источника коррелированных фотонных пар, генерируемых в фотонно-кристаллических волокнах при накачке излучением титан-сапфирового фемтосекундного генератора. Наиболее подробно рассматривается процесс генерации одиночных фотонов и коррелированных фотонных пар в волокнах с высоким двулучепреломлением в процессе векторного четырехволнового взаимодействия (ЧВВ). Продемонстрировано, что векторное ЧВВ фемтосекундных лазерных импульсов в двулучепреломляющем высоконелинейном оптическом фотонно-кристаллическом (микроструктурированном) световоде может быть источником широкополосного многомерного перепутывания в непрерывных переменных с тонко настраиваемой энтропией и чистотой состояний. В заключение главы продемонстрированы возможности использования коррелированных фотонных пар для осуществления квантовой спектроскопии линейного поглощения органического красителя.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Необходимо отметить, что работа отражает большой объем проведенных экспериментальных исследований, выполненных с использованием современного оборудования и методик, что, помимо большого количества опубликованных статей и докладов на различных конференциях, подтверждает достоверность исследований, а также не только их научную новизну, но и практическую значимость. Список работ автора составляет 96 статей в рецензируемых журналах.

Оценивая работу в целом, хотелось бы выделить результаты по исследованию формирования перестраиваемых по длине волны импульсов вследствие солитонного самосдвига частоты в микроструктурированных световодах в ближнем инфракрасном диапазоне от хром-форстеритовых фемтосекундных источников. Солитонные импульсы обеспечивают перестройку в области 1.3–1.8 мкм, а пиковые интенсивности могут достигать мегаваттного уровня. При этом возможно их дальнейшее спектрально-временное преобразование в процессе генерации второй оптической гармоники в нелинейно-оптических кристаллах. Такое разнообразие возможностей обеспечивает технологичную платформу для реализации схем нелинейно-оптической спектроскопии и микроспектроскопии объектов различной природы. Реализация этого подхода нашла практическую демонстрацию в реализации КАРС-микроспектроскопии кремниевых и алмазных элементов, а также нелинейно-оптической визуализации биологических тканей.

Кроме того, хотелось бы отметить демонстрацию возможности волноводного увеличения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий и возможности управления свойствами волноводных мод полых фотонно-кристаллических

(микроструктурированных) волокон за счет изменения их структуры. Это позволяет значительно повысить чувствительность нелинейно-оптической спектроскопии газовых сред и снизить требования к энергиям лазерных импульсов в задачах нелинейной спектроскопии. Продемонстрированная возможность использования полых фотонно-кристаллических волокон с антирезонансной структурой оболочки для формирования предельно коротких импульсов гигаваттного уровня энергии поля в различных спектральных диапазонах обладает относительной простотой и технологичностью. Такие импульсы востребованы в широком спектре задач, связанных с изучением когерентных и фазочувствительных процессов, протекающих в сложных физических, химических и биологических системах на самых коротких временных масштабах.

Наконец, использование фотонно-кристаллических световодов для генерации коррелированных фотонных пар и одиночных фотонов имеет целый ряд преимуществ, связанных с широкими возможностями управления спектрально-временными характеристиками генерируемых квантовых состояний, наилучшими условиями для согласования источников квантовых состояний с волоконно-оптическими линиями связи, перспективой их дальнейшей миниатюризации и использования их в схемах интегральной оптики. В диссертации представлены новые особенности режимов векторного спонтанного четырехволнового взаимодействия в двулучепреломляющих, высоконелинейных фотонно-кристаллических световодах. Высокая яркость продемонстрированного источника (порядка 10^5 Гц/мВт) и контроль запутанности фотонных пар обеспечивают потенциал их использования для различных протоколов, связанных с квантовыми вычислениями, криптографией, спектроскопией или другими приложениями квантовой оптики.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. В третьей главе автором представлена серия экспериментов с микроструктурированными световодами с различными размерами сердцевин. Очень подробно исследовано волокно с диаметром сердцевин 5 мкм, для которого представлены различные режимы преобразования позволяющие укорачивать или наоборот удлинять импульсы. В тоже время с случае волокон с диаметром сердцевин порядка 20 мкм для получения коротких импульсов были использованы методики внешней компрессии, что усложняет экспериментальную схему. Остается неясным, возможны ли режимы компрессии импульсов непосредственно в волокнах с «большим» диаметром сердцевин.

2. В параграфе 4.2 содержится подробная информация о процедуре измерения импульсов ближнего инфракрасного диапазона с длительностью менее цикла поля. Автором отмечается, что важным фактором проведения измерений является наличие фазостабильных импульсов, Именно, за счет управления их фазой удалось наблюдать периодичность спектральной интерференции, которая и позволила делать выводы о длительности импульсов. Это является важным фактором, однако, в защищаемых положениях и выводах это не нашло должного отражения.

3. В главе 5 при обсуждении возможностей использования полых ФК волноводов в качестве зондов, повышающих эффективность КАРС-спектроскопии, на мой взгляд недостаточно четко обозначены перспективы и пределы достижения высокой чувствительности. Например, в разделе 5.2 показана возможность разделения вкладов оболочки и сердцевин в интегральную нелинейность для случая, когда волновод содержит азот при атмосферном давлении. Возникает вопрос, насколько сохраняется возможность такого разделения при уменьшении концентрации газа и, вообще, какие концентрации доступны в рамках предлагаемой схемы КАРС-спектроскопии?

4. В разделе 5.3 отмечается, что КАРС-микроспектроскопия может использоваться для исследования процессов фотоиндуцированной генерации носителей зарядов в кремниевых структурах, если повысить пространственное и спектральное разрешение. Было бы уместным обсудить пути повышения этих параметров.

5. На стр. 193 отмечается, что яркость разработанного источника бифотонов более чем на 2 порядка превышает результаты, обычно получаемые в процессе СПР в нелинейных кристаллах. На мой взгляд, важно еще провести сравнение с источниками на основе СПР в нелинейных волноводах, поскольку именно они наиболее активно используются в экспериментах по квантовой оптике.

6. На стр. 196 написано, что при любой мощности накачки должно соблюдаться равенство $g_{12}^2(0) = 2$ и далее обсуждаются возможные причины уменьшения этого значения в эксперименте. Однако следует отметить, что значение безусловной автокорреляционной функции в нуле зависит еще от степени чистоты квантового состояния и для смешанного состояния опускается до 1. Считаю, что эту возможность также нельзя исключать при анализе результатов.

Однако, указанные замечания не умаляют высокой оценки диссертационной работы и представленных в ней 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. Автореферат и сама диссертационная работа правильно оформлены согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук МГУ имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, считаю, что 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 – безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент, член-корреспондент РАН,
директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр
Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН)

Калачев Алексей Алексеевич

13 декабря 2024 года

Контактные данные:

Телефон:

E-mail: a.kalachev@knc.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.05 — «Оптика»

Адрес места работы:

420111, г. Казань, Лобачевского, д. 2/31

Телефон: +7 (843) 231-90-00; e-mail: presidium@knc.ru