

ОТЗЫВ

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

Диссертационная работа Федотова А.Б. посвящена различным аспектам транспортировки ультракоротких импульсов лазерного излучения и нелинейно-оптического преобразования их спектральных и временных характеристик в микроструктурированных оптических волокнах, (также называемых фотонно-кристаллическими волокнами), различных типов, а также применениям ультракоротких лазерных импульсов с преобразованными параметрами для различных спектроскопических применений. Волоконная оптика в настоящее время является одним из примеров, демонстрирующих стремительную интеграцию научных достижений в различные технологические области и повседневную жизнь, что прежде всего связывается с телекоммуникационными приложениями. Нелинейно-оптические эффекты всегда присутствуют в волоконных системах связи, что требует учета их влияние на распространение сигнала. С другой стороны, использование нелинейно-оптических преобразований в оптических световодах представляет собой интерес для реализации новых эффективных типов волоконных систем, как преобразователей лазерного излучения в различные спектральные диапазоны, в целях управления спектрально-временными характеристиками лазерных импульсов для различных научных и технологических приложений. Таким образом, научная тематика диссертации, направленная на решение важных задач распространения ультракоротких лазерных импульсов и трансформации их спектрально-временных характеристик в микроструктурированных оптоволоконных, **является безусловно актуальной** и соответствует современным приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка опубликованных статей по материалам диссертации, благодарностей и списка цитируемой литературы в количестве 438 наименований. Каждая глава содержит вступление, кратко описывающее ее содержание и направления представленных исследований. Общий объем диссертации составляет 251 страницу, включая 94 рисунка и одну таблицу.

Во введении представлены цель и задачи диссертации, обозначены объект и предмет исследований, сформулированы актуальность диссертации и методология исследований, приведены сведения о степени разработанности тематики исследований, описаны научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость работы,

сообщается об апробации результатов работы, о публикациях автора и структуре диссертации.

В первой главе приведен обзор основных свойств и особенностей структуры микроструктурированных (фотонно-кристаллических) световодов, которые обеспечивают их преимущества перед стандартными телекоммуникационными волокнами для целей нелинейно-оптического преобразования. Показано, что возможность локализации света в сердцевине фотонно-кристаллических волокон и управления дисперсией волокна делает их крайне привлекательными элементами для использования в качестве пассивных нелинейно-оптических преобразователей спектрально-временных характеристик ультракоротких лазерных импульсов. Представлены основные нелинейно-оптические механизмы, приводящие к спектрально-временным преобразованиям импульсов накачки, а также отличительные черты микроструктурированных световодов, определившие их активное применение в этом направлении. Особое внимание уделено генерации суперконтинуума, как явлению наиболее полно и ярко демонстрирующему основные нелинейно-оптические механизмы в оптических световодах. Обсуждаются принципы волноводного распространения лазерного излучения в полых фотонно-кристаллических волокнах и области их применения. Приведены основные методы расчета дисперсионных свойств фотонно-кристаллических волокон, определяемых их структурой, а также уравнения для анализа спектрально-временной эволюции импульсов накачки.

Поскольку диссертационная работа Федотова А.Б. в целом является экспериментальной, **во второй главе** представлена информация об основных элементах экспериментальной техники и методиках анализа спектрально-временных преобразований лазерных импульсов в микроструктурированных световодах. Кратко описываются лазерные системы, которые применялись для проведения экспериментов. В ходе выполнения исследований было использовано тринадцать различных лазерных систем, генерирующих ультракороткие лазерные импульсы излучения в диапазоне длительностей от 30 фс до 10 нс: фемтосекундные лазерные системы (на кристаллах титана с сапфиром, хром-форстерита, иттербия), а также источники пико- и наносекундной длительности на основе кристаллов Nd:YAG. Приведена сравнительная таблица используемых лазерных источников со ссылками на работы, где они использовались. Описана основная классификация и методика изготовления применяемых в экспериментальных исследованиях микроструктурированных волокон, изготовленных как отечественными, так и зарубежными производителями. Особое внимание уделено методикам измерения спектрально-временных характеристик сверхкоротких импульсов, формируемых в процессе нелинейно-оптического преобразования. В работе представлены автокорреляционные методики и различные варианты техники FROG (Frequency Resolved Optical Gating), а также подробно описана техника на основе методики прямого восстановления электрического поля SPIDER (Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction), позволяющей измерять временные и фазовые характеристики импульсов с длительностями порядка одного цикла поля.

В третьей главе и последующих главах представлены оригинальные результаты, которые составляют основное содержание работы. Описаны эксперименты с микроструктурированными волокнами со сплошной сердцевиной. Используемые волокна имеют различную структуру, как с точки зрения линейных размеров сердцевины (~ 5 мкм - 20 мкм) и их дисперсионных свойств, так и материалов, из которых они изготовлены (кварц или многокомпонентное стекло). В качестве оптической накачки используется излучение фемтосекундных лазерных систем на кристалле хром-форстерита с центральной длиной волны в области 1.25 мкм. Показано, что преимуществом такого подхода является возможность осуществления солитонного режима распространения импульсов излучения для широкого набора параметров используемых волокон (прежде всего, отличающихся размерами сердцевины). Поскольку нулевое значение дисперсии групповых скоростей кварца лежит в области центральной длины волны хром-форстеритовых источников, то реализация аномального режима распространения импульсов накачки достижима даже для микроструктурированных волокон с большой площадью сердцевины. При прохождении импульсов излучения накачки вдоль микроструктурированного кварцевого волокна с площадью сердцевины ~ 20 мкм² за счет явления солитонного самосдвига частоты наблюдается значительное смещение спектра исходного импульса излучения в длинноволновую область спектра - от 1.3 до 1.8 мкм. Энергия лазерных импульсов на выходе волокна составляет нескольких нДж, длительность варьируется в пределах 35 – 70 фс, а пиковая мощность достигает значений ~100 кВт. Описаны эксперименты, демонстрирующие возможность генерации гораздо более мощных перестраиваемых импульсов при использовании микроструктурированных волокон с большими площадями сердцевины. В частности, показана временная компрессия импульсов после нелинейно-оптического преобразования в подобных волокнах до длительностей порядка 20 фс и мегаваттных пиковых мощностей. Помимо формирования перестраиваемых импульсов в инфракрасной области спектра в процессе солитонного самосдвига частоты, продемонстрированы различные режимы генерации излучения в видимой области за счет перекачки энергии в виде дисперсионных волн или генерации третьей оптической гармоники, что еще более расширяет спектральный диапазон формируемых импульсов в процессе нелинейного преобразования частоты от хром-форстеритовых источников. Продемонстрирована возможность формирования ультракоротких импульсов с длительностью в несколько циклов поля при когерентном сложении нескольких солитонов. Осуществлены также режимы, где наблюдается существенное (до 6.5 раз) спектральное сжатие импульсов.

В четвертой главе обсуждаются различные режимы распространения лазерных импульсов в полых фотонно-кристаллических волокнах. За счет структуры оболочки и низкой плотности газа, заполняющего сердцевину, полые фотонно-кристаллические волокна обеспечивают возможность волноводного распространения импульсов с гораздо большими (до трех порядков) энергиями и пиковыми мощностями относительно световодов со сплошной твердотельной сердцевиной. Представлены результаты по исследованию транспортировки импульсов излучения от нано-, пико- и фемтосекундных лазерных источников в различных режимах в полых фемтосекундных световодах. Энергия и мощность импульсов излучения на выходе оптоволокна

удовлетворяет различным задачам, в том числе связанным с биомедицинскими применениями, что было продемонстрировано в экспериментах по разрушению различных живых тканей. Выполнен анализ физических механизмов, приводящих к генерации мультиоктавного суперконтинуума в полых антирезонансных фотонно-кристаллических световодах при накачке фемтосекундными импульсами ближнего и среднего инфракрасного диапазона. Сложная спектрально-временная динамика распространяющихся импульсов накачки обеспечивает формирование в режиме солитонной самокомпрессии импульсов с длительностью менее одного цикла поля и гигаватными уровнями пиковых мощностей. Эти результаты могут найти применения в задачах аттосекундной физики и квантовой химии.

В пятой главе продемонстрированы приложения микроструктурированных волокон различных типов для целей спектроскопии, микроспектроскопии и квантовой оптики. В качестве основного нелинейно-оптического метода рассматривается процесс на основе когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). Полые фотонно-кристаллические волокна представлены как объекты для нелинейной химически селективной сенсорики газов, заполняющих полую сердцевину волокна или вещества, осаждаемого на стенках полой сердцевины. Волноводный характер распространения импульсов накачки многократно увеличивает эффективность нелинейно-оптического процесса КАРС, а учет влияния нелинейности оболочки волокна повышает спектральную точность измерений. За счет широкого диапазона перестройки центральной длины волны солитонов, сформированных при распространении исходного импульса излучения хром-форстеритового лазера, возможности управления спектральными и временными свойствами солитонов, а также дополнительной опции удвоения частоты импульсов накачки продемонстрированы эффективные схемы КАРС спектроскопии и микроскопии объектов различной природы. Построены двумерные КАРС спектрограммы оптических фононов в кремниевых и искусственных алмазных пленках, а также карты различных областей головного мозга мыши с различной концентрацией миелина. Представлена методика определения порога разрушения биологических тканей, которое может быть интерпретировано как процесс накопления свободных электронов при воздействии высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов на биологические ткани, и может быть зарегистрировано за счет детектирования высокочастотного сдвига спектров КАРС. Представлены результаты по созданию, изучению и оптимизации источника коррелированных фотонных пар на основе высоконелинейных двулучепреломляющих фотонно-кристаллических световодов. Наиболее подробно рассматривается процесс генерации одиночных фотонов и коррелированных фотонных пар в волокнах с высоким двулучепреломлением в процессе векторного спонтанного четырехволнового взаимодействия при накачке излучением фемтосекундного титан-сапфирового лазера. Продемонстрировано, что дисперсионные и нелинейные свойства двулучепреломляющих фотонно-кристаллических волокон обеспечивают различные режимы векторного спонтанного четырехволнового взаимодействия, что позволяет говорить о возможности реализации яркого источника фотонных пар с управляемой степенью их перепутывания. Продемонстрировано использование перепутанных фотонных пар для осуществления квантовой спектроскопии линейного поглощения.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

В диссертационной работе автором представлено большое количество исследований, относящихся к нескольким областям современной физики: волоконная оптика, нелинейная спектроскопия и микроспектроскопия, физика предельно коротких лазерных импульсов, сенсорика и квантовая оптика. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой систематическое научное исследование различных режимов нелинейно-оптического преобразования лазерного излучения в микроструктурированных волокнах различных типов, - как со сплошной сердцевиной, так и полых, для формирования ультракоротких лазерных импульсов с управляемыми спектрально-временными характеристиками, включая их центральную длину волны, длительность и спектральную ширину, которые, как продемонстрировано автором, могут найти свое применение для нелинейной спектроскопии и микроспектроскопии, в том числе биологических объектов. Основные положения диссертации прошли апробацию в научной периодической печати и на конференциях. Результаты исследований, вошедших в работу, опубликованы в 96 журнальных статьях и 1 патенте, а также докладывались на многочисленных международных научных конференциях. Положения, выносимые на защиту, и выводы диссертации обоснованы высоким научно-техническим уровнем экспериментов, проведенных автором, и глубокими знаниями диссертанта в области современной лазерной физики, нелинейной спектроскопии и квантовой оптики. Таким образом, **представленные в диссертационной работе научные положения, выводы и рекомендации надежно обоснованы.**

К наиболее **важным и значимым результатам, определяющим научную новизну и практическую значимость диссертационной работы**, на мой взгляд, можно отнести следующие результаты.

1. Разработана экспериментальная эффективная схема на основе хром-форстеритовых лазеров и микроструктурированных световодов со сплошной сердцевиной с эффективной площадью моды порядка 20 мкм^2 для получения перестраиваемых спектрально-ограниченных импульсов излучения с мегагерцовой частотой повторения в диапазоне от 1.3 до 1.8 мкм. Показано, что процесс солитонного самосдвига частоты обеспечивает плавную перестройку центральной длины волны импульсов с энергиями до нескольких наноджоулей, а удвоение частоты перестраиваемых солитонов и импульсов основного излучения хром-форстеритовых лазеров приводит к формированию импульсов излучения с управляемыми спектрально-временными характеристиками в диапазоне 600 – 900 нм.
2. Продemonстрировано, что вышеуказанная схема на основе хром-форстеритовых лазеров и микроструктурированных световодов является эффективной платформой для реализации методов нелинейной визуализации, включая

спектроскопию и микроскопию на основе когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) как в ближней инфракрасной, так и видимой области спектра. В экспериментах по КАРС микроспектроскопии объектов различной природы (кремниевые элементы, алмазные пленки и ткани головного мозга мышей) была продемонстрирована работоспособность и эффективность такой платформы. Показано, что эффективность нелинейно-оптической спектроскопии достигается в том числе за счет возможности управления (сужения) ширины спектральных линий при распространении импульсов в микроструктурированных световодах.

3. В экспериментах показано, что использование полых тонкостенных антирезонансных световодов револьверного типа, заполненных аргоном при высоком давлении, обеспечивает нелинейно-оптическое преобразование фемтосекундных импульсов ближнего и среднего инфракрасного диапазона с субмилиджоулевыми уровнями энергий в режиме солитонной самокомпрессии, что приводит к генерации мультиоктавного суперконтинуума и формированию высокоэнергетичных предельно коротких импульсов с длительностями порядка одного цикла поля и гигаваттными уровнями пиковых мощностей. Такие импульсы являются уникальными инструментами для аттосекундной физики и управления сверхбыстрыми процессами в веществе.
4. Экспериментально доказано, что дисперсионные свойства двулучепреломляющих, высоконелинейных фотонно-кристаллических световодов с двумя нулями дисперсии групповых скоростей обеспечивают управление режимами генерации коррелированных фотонных пар в процессе векторного спонтанного четырехволнового взаимодействия (ЧВВ), а корреляционными свойствами фотонных пар, генерируемых в процессе векторного ЧВВ, можно управлять, создавая как высокочистые низкоразмерные запутанные состояния, так и высокоэнтропийные запутанные состояния в пространстве высокой размерности.

По диссертационной работе Федотова А.Б. имеются следующие замечания:

1. В диссертации содержится очень большое количество исследовательского и информационного материала, что налагает требования на ее четкое структурирование. К сожалению, последнее выполняется не всегда.

1.1. Оригинальные результаты исследований, которые составляют основное содержание работы, представлены в третьей, четвертой и пятой главах диссертации, посвященных, соответственно, проблемам транспортировки ультракоротких импульсов лазерного излучения и нелинейно-оптического преобразования их спектрально-временных характеристик в микроструктурированных оптических волокнах со сплошной серединой (глава 3), в полых микроструктурированных волноводах (глава 4) и различным применениям микроструктурированных световодов (глава 5). К

сожалению, основные результаты, соответствующие каждой из этих глав, не приведены в конце каждой главы.

1.2. В то время как последовательность изложения основных результатов в Заключение соответствует порядку изложения научных материалов, (на основе которых эти результаты сформулированы), в основном тексте диссертации, т.е. от оптоволокон с со сплошной сердцевиной к полым волноводам и далее к применениям, то порядок защищаемых положений во Введении противоположен – от полых волноводов к волноводам со сплошной сердцевиной. Логика такого представления не обоснована.

2. Некоторые формулировки в ряде основных результатов и защищаемых положениях не информативны. Например, «Использование генерируемых в хром-форстеритовом лазере с *удлиненным* резонатором...». Удлиненным по отношению к чему? (стр.214, первый результат, аналогичный вопрос к защищаемому положению №4, стр. 13). «...микроструктурированных волокнах с *увеличенной* сердцевиной...». Увеличенной по отношению к чему, на сколько? (стр.214, 2-й результат). Продемонстрированы *особенности* спектрального уширения фемтосекундных импульсов...». Какие особенности? (стр.214, 3-й результат).

3. Замечания по рисункам.

3.1. Рис.1.1.3 в, стр. 27 – нет пояснений, что обозначают цифры 1, 2, 3 ... 6.

3.2. Рис. 1.3.2, стр. 34 - не приведен размер модовой структуры.

3.3. Рис.1.4.1, стр.38 – на графике не приведен спектр суперконтинуума с длиной волны короче 1.1 мкм, в то время как на рисунке приведена иллюстрация излучения видимого диапазона.

4. В тексте диссертации имеются многочисленные опечатки: «Наиболее *распатроненным* методом формирования исходной...» (стр.58); «...*советующие* коэффициенты...» (стр.60), «...длине волны *антистокосва* сигнала...» (стр.150), и др.

Приведенные выше замечания не умаляют научной значимости диссертации.

Диссертационная работа Федотова А.Б. выполнена на высоком научном уровне, ее результаты решают проблемы транспортировки ультракоротких импульсов лазерного излучения и нелинейно-оптического преобразования их спектральных и временных характеристик в микроструктурированных оптических волокнах различных типов, а также обосновывают применения ультракоротких лазерных импульсов с модифицированными параметрами для различных спектроскопических применений. Совокупность результатов и положений, содержащихся в диссертации, позволяют квалифицировать ее как значительное достижение в области лазерной физики, нелинейной оптики, нелинейной спектроскопии и квантовой оптики. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация Федотова А.Б. отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Диссертация является законченным научным исследованием и по своему содержанию соответствует специальности 1.3.19.— лазерная физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным п.п. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Федотов Андрей Борисович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

Руководитель Отделения квантовой радиофизики им.Н.Г.Басова
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор

Ионин Андрей Алексеевич

29 ноября 2024 г.

Специальность, по которой защищена диссертация оппонента:

01.04.21 –Лазерная физика

Контактные данные:

тел.: , e-mail: ioninaa@lebedev.ru

Адрес места работы:

119991, г. Москва, Ленинский пр., д.53

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Отделение квантовой радиофизики

Подпись руководителя Отделения квантовой радиофизики им.Н.Г.Басова

Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

А.А. Ионина удостоверяю:

Ученый секретарь

Физического института им.П.Н.Лебедева РАН

А.В. Колобов

29 ноября 2024 г.