

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА**

*На правах рукописи*

**Федотов Андрей Борисович**

**Спектрально-временные преобразования лазерных  
импульсов в микроструктурированных световодах  
для нелинейно-оптической спектроскопии**

1.3.19. Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2024 г.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОЫ

### Актуальность темы

Нелинейная оптика является обширным разделом современной физики, неразрывно связанным с развитием и использованием лазерных источников излучения. Под нелинейно-оптическими явлениями прежде всего мы понимаем эффекты, приводящие к изменению исходных амплитудных, частотных и временных характеристик лазерных импульсов, и возникающие в связи с нелинейным характером взаимодействия этих импульсов со средой, в которой они распространяются или воздействуют на нее. В первую очередь такие эффекты проявляются в появлении новых спектральных компонент относительно исходного излучения. Несмотря на то, что нелинейно-оптические эффекты были продемонстрированы еще в «долазерную эпоху», именно с развитием лазеров эта тематика начала стремительно развиваться, и как уже было отмечено, в настоящее время сейчас практически невозможно рассматривать лазерную физику без нелинейных явлений. Более того, на их использовании построена значительная часть лазерных источников, в первую очередь направленных на генерацию сверхкоротких лазерных импульсов.

Стремительный прогресс физики лазеров и нелинейной оптики способствовал развитию ряда смежных разделов науки и технологий, в том числе волоконной оптики. В современных телекоммуникационных приложениях оптические световоды занимают доминирующее положение, однако их применение далеко не ограничивается задачами передачи информации. На основе оптических волокон созданы и широко используются волоконно-оптические усилители, модуляторы, источники лазерного излучения и многое другое. Более того, расширяются не только области применения оптических световодов, но также радикально изменяется сама их концепция и архитектура [1].

Заметной вехой в области развития волноводов, явилось создание в конце прошлого века *фотонно-кристаллических или микроструктурированных* волокон [2]. Оболочка в этих волокнах изготовлена из материала с тем же показателем преломления что и у сердцевины, но выполнена в виде набора плотно упакованных капилляров микронного и субмикронного размера. Как было сразу отмечено в посвященной этой тематике пионерских работах, в фотонно-кристаллических волокнах возникают новые особенности распространения волн: во-первых, это *одномодовый* режим, который в отличие от стандартных волокон возможен для аномально широкого спектрального диапазона; во-вторых, волноводный режим может поддерживаться не только за счет явления полного внутреннего отражения, но также за счет высокой отражательной способности периодической структуры оболочки. При распространении коротких лазерных импульсов в сердцевине таких волокон, обладающих размером порядка нескольких микрометров, достигается высокая интенсивность света за счет высокой степени локализации, что приводит к проявлению или сильному увеличению эффективности различных нелинейно-оптических эффектов [3–5]. Высокий потенциал микроструктурированных волокон был быстро осознан научным сообществом, и не без основания отмечалось [6,7], что микроструктурированные волокна открыли новую главу волоконной нелинейной оптики,

позволив переосмыслить или найти новые особенности нелинейно-оптических явлений в волоконном формате.

Радикальное увеличение эффективности нелинейно-оптических взаимодействий и возможность управления дисперсионными свойствами волноводных мод позволило использовать лазерные импульсы малых энергий, включая неусиленные лазерные импульсы от фемтосекундных источников. Наиболее ярким и известным примером является генерация суперконтинуума, которое заключается в сверхуширении спектра импульса накачки до одной октавы и более [8]. Явление генерации суперконтинуума приводит к революционным изменениям в области оптической метрологии и активно используется в лазерной биомедицине, спектроскопии, фотохимии, оптике сверхкоротких импульсов. Возможность направленного управления дисперсией волноводных мод в очень широких пределах оказывается не менее важным свойством микроструктурированных волокон относительно их высокой нелинейности, в частности это позволяет решать проблему фазового согласования для различных процессов четырехволнового взаимодействия. В связи с этим микроструктурированные волокна могут использоваться не только как источники широкополосного излучения, но и как более “специфичные” преобразователи частоты лазерных импульсов. Оптические элементы для преобразования частоты и нелинейно-оптической трансформации спектра сверхкоротких импульсов на основе микроструктурированных волокон существенно расширяют возможности фемтосекундных лазерных систем, позволяя использовать сверхкороткие импульсы, в том числе неусиленные лазерные импульсы, для решения широкого класса задач фундаментального и прикладного характера в области спектроскопии, телекоммуникационных технологий, когерентного и квантового контроля, оптики сверхкоротких импульсов и биофотоники.

В диссертационной работе представлены результаты многолетних исследований, которые проводились в группе фотоники и нелинейной спектроскопии физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова в сотрудничестве с различными отечественными и зарубежными группами по широкому спектру направлений, связанных с исследованием линейных и нелинейных свойств микроструктурированных волокон, новых режимов распространения и нелинейно-оптического преобразования лазерных импульсов накачки. С точки зрения хронологии, результаты с достаточной степенью условности могут быть разделены на две части. Во-первых, это исследования проводимые в первой декаде этого века, которые связаны прежде всего со спектрально-временными преобразованиями импульсов накачки от фемтосекундных лазерных систем на кристалле хром-форстерита в микроструктурированных волокнах изготовленных из различных материалов и имеющих различные масштабы и архитектуру, а также применением получаемого излучения для реализации различных протоколов нелинейно-оптической спектроскопии и микроскопии, прежде всего на основе когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). Вторая часть исследований, выполненная в последние семь-восемь лет, во многом использует наработки и методики развитые на первом этапе и связана с демонстрацией возможности использования спектрально-временных преобразований лазерных импульсов для получения предельно коротких импульсов с длительностью менее одного цикла поля, что

находит применения для задач аттосекундной физики или петагерцовой оптоэлектроники, или генерации квантовых состояний света с регулируемыми спектральными и корреляционными свойствами. Можно сказать, что результаты диссертационной работы во многом отразили тенденции и направления тематики исследования и применения нелинейно-оптических преобразований в фотонно-кристаллических (микроструктурированных) световодах.

### **Степень разработанности исследуемых проблем**

Вопросы исследования и использования нелинейно-оптических эффектов в оптических волокнах занимают заметную нишу в современных научных, прикладных и технологических задачах. При рассмотрении области телекоммуникационных приложений оптических световодов нелинейно-оптические эффекты должны быть учтены для уменьшения искажений передачи информации, связанной с возможным временным или спектральным перекрытием сигнальных импульсов. С другой стороны нелинейно-оптические эффекты могут способствовать стабильному процессу передачи информации при формировании устойчивых форм распространяющегося в волокне электромагнитного излучения (солитонов). Волоконная нелинейная оптика в настоящее время является развитым научным направлением, исследующим нелинейно-оптические эффекты, методы управления их эффективностью и возможными приложениями.

*Фотонно-кристаллические* (ФК) оптические волокна – это световоды, отличающиеся по своей архитектуре и волноводным свойствам от стандартных телекоммуникационных волокон, использующих явление полного внутреннего отражения, проявляющегося из-за разницы показателей преломления сердцевины и оболочки, задаваемой степенью их допирования. В отличие от этих принципов, оболочка и сердцевина ФК волокон изготавливается из материала с одинаковым показателем преломления, а возможность волноводного распространения реализуется за счет структурирования оболочки (в общем случае и сердцевины) отверстиями микронного масштаба. В реализованных первых волокнах этого типа оболочка представляла двумерную периодическую структуру, образованную воздушными отверстиями в стекле, что дало название этому новому типу световодов [2]. После этой пионерской работы, опубликованной в 1996 году был быстро понят огромный потенциал ФК световодов, связанный прежде всего с возможностью масштабного изменения их структуры, и как следствие возможностью варьирования их линейными, нелинейными и дисперсионными свойствами в направлениях и диапазонах принципиально недоступных для стандартных телекоммуникационных волокон. В связи с тем, что периодичность структуры в оболочке волокна не является необходимым условием существования волноводного режима распространения излучения, также часто использовались термины *дырчатые (holey)* или *микроструктурированные (microstructured)* световоды. Эти термины подчеркивали особенность структуры этих волокон, связанную с использованием одного материала с одинаковым показателем преломления для оболочки и сердцевины, но наличием структурирования оболочки капиллярами микронного и субмикронного размера. Однако, стало быстро понятно, что и

эти названия не могут охватить всего разнообразия созданных структур, существенно различающихся по архитектуре, идеологии и областям применения. В настоящее время в англоязычной литературе принято объединять подобные типы волноводов исторически сложившимся термином «*фотонно-кристаллические*», который, как отмечалось, не определяет, но выделяет целый класс оптических волноводов, у которых структура и принципы формирования направляемых волноводных мод существенно отличаются от «стандартных» телекоммуникационных световодов. В русскоязычной литературе наряду с термином *фотонно-кристаллические* (ФК) более часто используется *микроструктурированные* (МС) волокна [6], что и определило выбор термина, используемого в названии настоящей диссертационной работы. Следуя сложившейся тенденции, в работе употребляются оба названия, считая их равноценными и взаимозаменяемыми. Для выделения определенных особенностей методов изготовления, структуры и свойств световодов, к этим названиям добавляются дополнительные термины (например, *полые фотонно-кристаллические* световоды) или используются другие отличительные названия (например, *наноструктурированные* или *перетянутые* волокна).

Начиная с конца 90-х годов наблюдался лавинообразный характер нарастания числа работ в области фотонно-кристаллических световодов, что прежде всего было связано с демонстрацией возможности радикального увеличения эффективности нелинейно-оптических процессов для неусиленных импульсов фемтосекундных источников (прежде всего Ti:Sapphire генераторов). Идеология микроструктурированных волокон позволяет реализовывать режимы волноводного распространения с высокой степенью локализации излучения в сердцевине волновода. Наиболее ярким примером демонстрации преимуществ МС волокон явилась генерация суперконтинуума («белого света»), включающая целый набор нелинейно-оптических явлений (фазовая самомодуляция, фазовая кросс-модуляция, четырехволновое взаимодействие, модуляционные неустойчивости, солитонные явления и др.) [1,2,6,9,10]. Основные физические механизмы эффективной генерации суперконтинуума в МС волокнах связаны с фазовой самомодуляцией (ФСМ), фазовой кросс-модуляцией (ФКМ), четырехволновыми взаимодействиями (ЧВВ) и модуляционной неустойчивостью. Наибольшая эффективность спектрального преобразования сверхкоротких импульсов в МС волокнах достигается в режиме аномальной дисперсии, где ключевую роль играют солитонные явления, в том числе солитонный сдвиг частоты (ССЧ) [11,12], приводящий к низкочастотному смещению центральной частоты солитона, а также солитонные неустойчивости [13,14], индуцирующие излучение новых спектральных компонент, смещенных в высокочастотную область спектра. Спектральная ширина излучения суперконтинуума при определенных условиях может составлять несколько октав. Межмодовое фазовое согласование может приводить к возникновению интенсивного сигнала вблизи частоты третьей гармоники [15], который может вносить существенный вклад в генерацию широкополосного излучения на выходе волокна. Некоторые специальные типы МС волокон характеризуются сильной анизотропией формы, обусловленной эллиптической формой сердцевины, что приводит к возникновению двулучепреломления. В таких волокнах удастся осуществить поляризационное управление явлением генерации суперконтинуума [16–18], а также реализовать поляризационное

демультиплексирование излучения суперконтинуума [19], выделив из широкополосного излучения участки спектра с различной поляризацией. Таким образом, благодаря появлению новых волноводных структур, генерация суперконтинуума получила широкое распространение как метод решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач оптики сверхкоротких импульсов, нелинейной спектроскопии и микроскопии, лазерной биомедицины, оптической метрологии [10]. Полученные результаты указывают на возможность использования явления генерации суперконтинуума в микроструктурированных волокнах для создания нового поколения оптических параметрических усилителей и источников излучения для спектроскопических, метрологических и биомедицинских приложений. Микроструктурированные световоды уже прочно занимают позиции во многих научных приложениях, связанных с лазерной физикой и нелинейной оптикой. В настоящее время производство МС световодов осуществляется несколькими компаниями в Англии, США, Дании, Австралии и Китае и такие волокна являются коммерчески доступным продуктом.

Наша группа фотоники и нелинейной спектроскопии МГУ имени М.В.Ломоносова, возглавляемая профессором А.М.Желтиковым, одной из первых в России начала последовательно интересоваться этой тематикой, что происходило в тесном сотрудничестве с коллегами в Институте Технологии Обработки Стекланных Структур, (ТОСС, Саратов), Саратовском Государственном Университете имени Н.Г.Чернышевского (СГУ, Саратов) и Государственном Оптическом Институте имени С.И.Вавилова (ГОИ, Санкт-Петербург). В первой главе представлено описание основных свойств, классификации, особенностей строения микроструктурированных световодов и происходящих в них нелинейно-оптических процессов. При этом большое внимание уделяется описанию собственных результатов, изложенных в заметном количестве публикаций, свидетельствующем, что уровень проводимых исследований был высоко оценен научным сообществом.

Представленные в диссертационной работе экспериментальные результаты были получены на протяжении более чем двух десятков лет в различных лабораториях и организациях. Для решения поставленных задач требовалось обладать тремя основными составляющими - непосредственно микроструктурированными световодами, лазерными источниками импульсов накачки и измерительно-аналитическим оборудованием для проведения анализа спектрально-временных трансформаций излучения накачки. Благодаря финансовой поддержке со стороны различных фондов и кооперации с другими научными группами, в исследованиях удавалось применять самое современное научное оборудование и методики, представленные во второй главе.

Особое значение в наших исследованиях играли фемтосекундные лазерные системы на основе кристалла хром-форстерита ( $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ), что во многом было связано с многолетним и плодотворным сотрудничеством с Центром Фотохимии РАН, которое далее нашло развитие в разработке ряда лазерных генераторов непосредственно в нашей группе. Использование хром-форстеритовых лазеров (наряду с широко развиваемыми в настоящее время иттербиевыми технологиями) и микроструктурированными волокнами позволяет реализовать новые интересные режимы нелинейно-оптического преобразования, на основе

которых реализованы перестраиваемые источники сверхкоротких импульсов в широком спектральном диапазоне. При этом хотелось бы отметить заметное значение исследований, проводимых именно в МГУ имени М.В.Ломоносова для развития источников на кристалле хром-форстерита. В частности, в 2000 году была опубликована работа [20], сформулировавшая основные перспективы этих источников для развития оптики сверхкоротких импульсов, и это нашло свое продолжение в создании современной лазерной установки для разнонаправленного исследования в области фемтосекундной оптики среднего инфракрасного диапазона [21].

Расширение спектральной области получения перестраиваемых сверхкоротких лазерных импульсов относительно наиболее развитых технологий на основе кристалла Ti:Sapphire (центральная длина волны 800 нм) представляет собой одну из важных задач лазерной физики уже на протяжении последних трех десятилетий и не теряет своей актуальности в связи высокой востребованностью для решения многих прикладных задач. Одно из очевидных и важных преимуществ оптических волноводов в качестве элементов, на которых возможно реализовать источники перестраиваемых лазерных импульсов, заключается в их компактности и относительно невысокой стоимости. При рассмотрении нелинейно-оптических эффектов можно отметить особую роль солитонных механизмов спектрально-временного преобразования импульсов, которые реализуются при их распространении в среде с аномальной дисперсией, в результате которого нелинейный набег фаз может быть уравновешен дисперсионным вкладом, обеспечивая выделенное распространение “солитоноподобных” импульсов с изолированной спектральной фазой относительно “несолитонной” части поля. При распространении сверхкоротких импульсов в солитонном режиме наблюдаются нелинейно-оптические преобразования спектра импульсов, в частности, эффективная генерация суперконтинуума и солитонный самосдвиг частоты (ССЧ), который заключается в постепенном сдвиге центральной частоты солитона в низкочастотную область спектра [11,22]. Микроструктурированные волокна обеспечивают существенное увеличение скорости ССЧ [23] за счет высокой степени концентрации лазерного излучения в сердцевине МС волокна с малой площадью поперечного сечения. Оптимизация дисперсионного профиля МС волокон позволяет добиться высокой эффективности передачи энергии маломощных сверхкоротких лазерных импульсов накачки в сдвигаемый по частоте солитон [24]. Благодаря такому сочетанию возможностей, МС-волокна позволяют использовать явление ССЧ для плавной перестройки маломощных импульсов с длительностью огибающей, соответствующей нескольким периодам оптического поля [25], а также реализовать новые, удобные и надежные схемы синхронизации импульсов накачки и затравки в оптических параметрических усилителях чирпированных импульсов [26]. Характерной особенностью представленных в третьей главе работы результатов является использование для оптической накачки волокон излучения с длиной волны, близкой к центральной длине волны хром-форстеритовых источников (1.25 мкм), что обеспечивает не только их эффективное и разнообразное применение, но и является принципиальным вопросом. Поскольку точка нуля дисперсии групповых скоростей плавленого кварца лежит в близкой области, это обеспечивает возможность распространения импульсов в режиме аномальной

ДГС и реализации их солитонного распространения и преобразования для широкого спектра масштабов (диаметр сердцевин от 5 до 20 мкм) и структур МС световодов со сплошной сердцевиной. В главе также изложены вопросы, связанные с возможностью эффективного получения импульсов в видимой области спектра в процессе излучения дисперсионных волн или генерации третьей оптической гармоники от смещающихся по длине волны солитонных импульсов. Такое разнообразие обеспечивает широкую платформу формирования различных практических схем нелинейно-оптической спектроскопии и микроспектроскопии объектов различной природы, что нашло свое отражение в пятой главе.

Повышение энергии и пиковой мощности передаваемых в волоконном формате лазерных импульсов является задачей, обеспечивающей очевидные преимущества для многочисленных научных применений. Мощность лазерных импульсов, транспортируемых по стандартным оптическим волокнам, ограничена порогом оптического пробоя материала сердцевин и различными нелинейно-оптическими явлениями. Полые фотонно-кристаллические (ФК) волноводы [5,6,27] впервые позволили сформировать устойчивые изолированные пространственные направляемые моды мощных сверхкоротких световых импульсов и осуществить эффективные нелинейно-оптические преобразования таких полей в режимах, близких в одномодовому [28]. Волноводный режим распространения электромагнитного излучения в полой сердцевине полых ФК-волноводов обеспечивается за счет высокой отражательной способности двумерно-периодической (фотонно-кристаллической) структуры оболочки этих волноводов в области фотонных запрещенных зон [27]. В материале четвертой главы 4 последовательно рассмотрены вопросы, касающиеся исследования свойств и возможности применения полых фотонно-кристаллических волокон в актуальных задачах транспортировки и нелинейно-оптической компрессии мощных лазерных импульсов видимого, ближнего и среднего инфракрасного диапазона.

Высокое спектральное, временное и пространственное разрешение современных спектроскопических методов обеспечивает получение информации о беспрецедентно широком диапазоне физических и химических свойств различных объектов, что возможно делает спектроскопию наиболее распространенным и развитым методом современных физических измерений. Применение импульсных лазерных источников открывает возможность реализации многочисленных нелинейно-оптических методов, которые радикально расширяют возможности неразрушающей физической и химической характеристики веществ или биологических структур с недостижимыми для линейной оптики временным и пространственным разрешением, информативностью, химической селективностью, чувствительностью и другими преимуществами. В диссертации рассматриваются два направления использования МС волокон. Во-первых, такие волокна могут использоваться в качестве эффективных элементов, многократно повышающих эффективность методов нелинейно-оптической спектроскопии. Ряд нелинейно-оптических методов, проявивших эффективность и получивших заметную популярность, основан на процессах четырехволновых взаимодействий (ЧВВ). Когерентное антистоксово рассеяние света (КАРС) является одним из таких нелинейных спектроскопических методов, который

активно развивался уже с 60-х годов прошлого века, и в развитие которого заметный вклад внесли профессора МГУ им.М.В.Ломоносова С.А.Ахманов и Н.И.Коротеев [29–31]. В работе [32] впервые было продемонстрировано значительное увеличение эффективности процессов четырехволнового взаимодействия в полном диэлектрическом капилляре в многомодовом режиме. По существу, эта работа открыла новое направление в сенсорике газовых сред, использующее полые волноводы в качестве элементов для нелинейно-оптической спектроскопии. Использование новых возможностей полых ФК волокон позволяет заметно расширить и углубить это направление, что представлено в первых разделах пятой главы на примере наносекундной КАРС-спектроскопии газовых сред.

С другой стороны, наличие перестраиваемого источника импульсов является принципиальным ключевым моментом при реализации КАРС-спектроскопии, поскольку обеспечивает попадание в резонанс разности частот стоксова импульса и импульса накачки. Еще в начале развития направления исследований микроструктурированных световодов был понят их потенциал для реализации источников перестраиваемых импульсов в качестве активных элементов волоконных лазеров или пассивных преобразователей частоты лазерного излучения [5,6,33–39]. Результаты, представленные в третьей главе по эффективной генерации суперконтинуума, перестраиваемых импульсов за счет солитонного самосдвига частоты от хром-форстеритового источника и возможности управления их спектрально-временными характеристиками, позволили говорить об удобной платформе для нелинейно-оптической микроскопии. Можно также утверждать, что в настоящее время наиболее широко востребованными методы нелинейной оптики оказываются в области нелинейно-оптической биовизуализации, и использование микроструктурированных волокон для этих целей сразу привлекло пристальное внимание. Первые работы по нелинейно-оптической биовизуализации с использованием фотонно-кристаллических световодов относятся к началу 2000-х годов, которые были реализованы с использованием фемтосекундных Ti:Sapphire лазеров в качестве накачки [40–42]. В дальнейших работах было представлено использование суперконтинуума для реализации мультимодальных методик с одновременной комбинацией различных нелинейно-оптических процессов [43–48]. Эта тематика нашла отражение в материалах диссертации, представляющих реализацию методики фемтосекундной КАРС-микроспектроскопии как для определения физических параметров оптических фононов в синтетических алмазных пленках, так и трехмерной визуализации с высоким пространственным разрешением химически селективных изображений тканей мозга лабораторной мыши.

В заключительных разделах диссертационной работы рассматриваются вопросы, которые имеют очень высокую востребованность в наши дни, а именно формирование и использование квантовых состояний света для квантовых вычислений [49] и криптографии [50]. Альтернативой наиболее распространенному методу генерации фотонных пар на основе спонтанного параметрического рассеяния (СПР) в нелинейных кристаллах с квадратичной нелинейностью [51] можно рассматривать процесс спонтанного четырехволнового взаимодействия (ЧВВ) в оптических волноводах, в том числе в фотонно-кристаллических оптических волокнах. Возможность получения коррелированных фотонных пар в стандартных одномодовых световодах впервые была продемонстрирована

в [52], но гораздо большая яркость, а также гибкость управления параметрами фотонной пары может быть достигнута в фотонно-кристаллических волокнах [53]. наиболее полный обзор результатов экспериментов по генерации фотонных пар и одиночных фотонов в ФК волокнах приведен в [54,55]. В наших исследованиях мы детально исследовали векторное четырехволновое взаимодействие, обеспечивающее новые режимы генерации коррелированных фотонных пар. Хотелось бы отметить, что формирование фотонных пар в векторном ЧВВ I-типа было исследовано достаточно подробно, в то время как ЧВВ II-типа практически не рассматривалось до наших работ. Высокая яркость продемонстрированного источника (порядка  $10^5$  Гц/мВт), возможность обеспечения режима генерации провозглашенных одиночных фотонов и контроля степени квантовой запутанности фотонных пар, наличие условий для использования непрерывных дешевых и технологичных источников обеспечивает хороший потенциал использования этих источников для различных протоколов, связанных с квантовыми вычислениями, криптографией или другими приложениями квантовой оптики. Неклассические свойства фотонных пар также дают неожиданные преимущества в методах нелинейной спектроскопии, например, сечение двухфотонного поглощения спектрально-запутанных пар линейно (а не квадратично) зависит от интенсивности падающего света [56]. Это обстоятельство позволяет рассчитывать на преимущество использования очень слабых потоков фотонов, что практически исключает возможность фотоповреждения образцов и особенно важно при работе с биологическими объектами. Применение развитого источника было продемонстрировано в наших работах для осуществления так называемой "фантомной" (квантовой) спектроскопии [57], что может иметь большие перспективы в дальнейших исследованиях.

**Цель настоящей диссертационной работы** состоит в комплексном исследовании особенностей нелинейно-оптического преобразования в различных типах и структурах микроструктурированных (фотонно-кристаллических) световодов при оптической накачке лазерными импульсами с широким спектром энергетических и спектрально-временных параметров, и демонстрация эффективного применения формируемого излучения в задачах нелинейно-оптической спектроскопии и микроспектроскопии, физики предельно коротких импульсов.

В задачи диссертационной работы входит:

- Анализ солитонных механизмов распространения и нелинейно-оптического преобразования фемтосекундных импульсов накачки с центральной длины волны в области 1.25 мкм, характерной для источников на основе кристалла Cr:forsterite, в различных типах микроструктурированных световодов со сплошной сердцевиной. Демонстрация возможностей формирования импульсов с различными уровнями пиковых мощностей (до нескольких мегаватт) и управляемыми спектрально-временными параметрами, включая получение импульсов с длительностями до нескольких циклов поля.
- Создание технологичной платформы на основе фемтосекундного хром-форстеритового генератора с удлиненным резонатором и различных типов микроструктурированных световодов, для получения перестраиваемых в видимой и инфракрасной области

фемтосекундных импульсов с мегагерцовой частотой повторения. Реализация на базе этой платформы схемы для нелинейно-оптической КАРС микроспектроскопии объектов различной природы.

- Исследование особенностей волноводного распространения высокоэнергетичных лазерных импульсов с нано-, пико- и фемтосекундными уровнями длительностей в полых фотонно-кристаллических (микроструктурированных) световодах.

- Демонстрация возможности использования полых фотонно-кристаллических (микроструктурированных) световодов в качестве элементов, обеспечивающих повышение эффективности нелинейно-оптической спектроскопии газовых сред на основе когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС).

- Исследование процесса генерации мультиоктавного суперконтинуума в полых антирезонансных световодах при накачке фемтосекундным излучением ближнего и среднего инфракрасного диапазона и анализ возможности формирования предельно коротких импульсов с длительностью порядка одного цикла поля и менее.

- Исследование и оптимизация источника коррелированных фотонных пар и одиночных провозглашенных фотонов на основе векторного спонтанного четырехволнового взаимодействия (ЧВВ) в высоконелинейных двулучепреломляющих фотонно-кристаллических (микроструктурированных) волокнах. Характеризации яркости источника фотонных пар и корреляционных свойств генерируемых квантовых состояний света. Анализ возможности генерации широкополосных и междиапазонных коррелированных фотонных пар с использованием импульсных и непрерывных источников оптической накачки. Реализация методики линейной фантомной спектроскопии с использованием частотно-коррелированных фотонных пар, полученных в процессе спонтанного ЧВВ в фотонно-кристаллических (микроструктурированных) световодах.

**Объектом исследования** являются нелинейно-оптические эффекты, возникающие при распространении импульсов накачки от различных лазерных источников в микроструктурированных световодах, имеющих различные масштабы и структуры.

**Предметом исследования** выступают процессы спектрально-временного преобразования лазерных импульсов, приводящие к изменению их характеристик, необходимых для осуществления различных протоколов нелинейно-оптической спектроскопии, микроскопии и сенсорики.

**Личный вклад автора.** Содержащийся в работе материал отражает результаты по направлению исследований нелинейно-оптических преобразований в микроструктурированных волокнах и их различных применений, проводимых в группе фотоники и нелинейной спектроскопии МГУ им. М.В.Ломоносова. Автор выполнил ряд базовых экспериментальных работ и развил оригинальные подходы исследования спектрально-временных преобразований в различных типах микроструктурированных световодов, характеризации формируемого излучения и его использования для приложений в области нелинейной спектроскопии и микроскопии. В диссертационной работе представлены результаты, полученные лично автором или под его непосредственным руководством. Автору принадлежит постановка конкретных экспериментальных задач,

нахождение их решений, развитие и обоснование экспериментальных методов, обобщение результатов.

### **Методология исследований**

Для достижения результатов применялся комплексный подход, основанный на экспериментальных исследованиях с использованием лазерных систем с импульсами пико и фемтосекундной длительности, а также теоретический анализ с использованием элементов численного моделирования.

Основные требования к проводимым исследованиям связаны с использованием микроструктурированных (с твердотельной и полый сердцевиной) световодов с различными параметрами, которые предоставлялись отечественными и зарубежными научными группами в рамках совместных исследований. Их структура и физические параметры характеризовались с помощью оптической и электронной микроскопии, а дисперсионные и нелинейные свойства оценивались как из результатов нелинейно-оптически экспериментов, так и в результате численного моделирования. Эксперименты проводились с различными типами лазеров на основе Ti:Sapphire, Cr:forsterite, Nd:YAG, иттербиевых твердотельных активных элементов. Длительность, энергия и спектральные параметры импульсов характеризовались с помощью сертифицированной измерительной аппаратуры. Для измерений импульсных оптических сигналов использовались различные методики накопления и усреднения, электронного стробирования (BOXCAR) и синхронного детектирования. При измерениях сверхкоротких импульсов наиболее принципиально сложной частью является анализ их временных и спектрально-фазовых параметров, в зависимости от конкретной задачи в работе применялись автокорреляционные методы, техники оптического стробирования с разрешением по частоте (FROG) и прямого восстановления электрического поля (SPIDER), которая позволяет не только определить профиль поля импульса, но и его спектральную фазу. Большинство экспериментальных результатов, связанных со спектрально-временными преобразованиями лазерных импульсов в микроструктурированных волокнах, проверялось и анализировалось 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 антистокосва рассеяния с использованием перестраиваемых импульсов, формируемых в микроструктурированных волокнах, большое значение уделялось соответствию их спектральных характеристик ширине возбуждаемых комбинационных резонансов. Нелинейно-оптическая микроспектроскопия подразумевает высокое пространственное разрешение, и для обеспечения этого требования использовались микрообъективы с большими числовой апертурой и увеличением, а также большое внимание уделялось неразрушающему характеру взаимодействия зондирующих импульсов с веществом, что особенно важно при работе с биологическими объектами. Можно сказать, что исследования соответствовали самым современным требованиям, как с точки зрения используемой аппаратуры, так и методик проведения экспериментов и их последующего анализа.

### **Научная новизна** результатов, полученных в диссертации:

Исследования, представленные в диссертационной работе, позволили достичь существенного прогресса в понимании фундаментальных физических закономерностей нелинейно-оптических взаимодействий лазерных импульсов в микроструктурированных волноводах, а также их использовании для различных протоколов нелинейно-оптической спектроскопии.

- На основе фемтосекундного Cr:forsterite генератора (центральная длина волны 1.25 мкм) и микроструктурированных световодов впервые продемонстрирован источник нано- и субнаноуджоулевых фемтосекундных импульсов с длительностью от 50 до 100 фс и спектральной перестройкой в диапазоне от 630 до 1800 нм, что реализуется при спектрально-временном преобразовании импульсов накачки в процессе солитонного самосдвига частоты в микроструктурированных световодах с последующим удвоением частоты в нелинейно-оптических кристаллах.

- При оптической накачке фемтосекундными импульсами с частотой повторения 20 МГц от Cr:forsterite (хром-форстеритового) генератора с удлиненным резонатором микроструктурированных волокон со сплошной сердцевиной диаметром порядка 5 мкм продемонстрирована генерация в процессе солитонного самосдвига частоты высокоэнергетичных (до нескольких наноджоулей) перестраиваемых по частоте солитонов в диапазоне от 1.3 до 1.8 мкм с энергией несколько наноджоулей. Измеренная длительность составляла менее 50 - 70 фс, а пиковая мощность солитонов достигала величины более 80 кВт. С использованием этих импульсов впервые была продемонстрирована КАРС спектроскопия когерентных оптических фононов в искусственной алмазной пленке.

- На основе фемтосекундного Cr:forsterite генератора (центральная длина волны 1.25 мкм) и микроструктурированных световодов впервые продемонстрирован источник нано- и субнаноуджоулевых фемтосекундных импульсов с длительностью от 50 до 100 фс и спектральной перестройкой в диапазоне от 630 до 1800 нм с управляемой спектральной шириной, что реализуется при спектрально-временном преобразовании импульсов накачки в процессе солитонного самосдвига частоты в микроструктурированных световодах с последующим удвоением частоты в нелинейно-оптических кристаллах.

- Впервые продемонстрировано, что оптическая накачка неусиленными импульсами хром-форстеритового генератора микроструктурированного волокна с увеличенным диаметром сердцевины (5 мкм) приводит к формированию последовательности сдвинутых по длине волны солитонных импульсов, которые могут использоваться для получения импульсов с длительностью несколько циклов поля в процессе их когерентного сложения. Возможность такого сценария подтверждается наличием интерференционной картины высокой видности, свидетельствующая о постоянстве спектральной фазы каждого из солитонов.

- Впервые продемонстрирована мультимодальная платформа для нелинейной микроспектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) на основе Cr:forsterite (хром-форстеритового) генератора фемтосекундных импульсов (центральная длина волны 1.25 мкм) микроструктурированных световодов с большой площадью кварцевой сердцевины и нелинейно-оптических кристаллов. Эта техника обеспечивает не

только проведение измерений в видимой и инфракрасной области, но также обеспечивает спектральную селективность за счет спектрального сужения зондирующих импульсов в микроструктурированных световодах и нелинейно-оптических кристаллах. Формирование последовательности фемтосекундных импульсов в процессе удвоения частоты в кристалле с периодической доменной структурой (PPLN) позволяет также реализовать режим нестационарной КАРС спектроскопии. Возможности реализованной методики продемонстрированы в экспериментах по сканирующей КАРС-микроскопии искусственных алмазных пленок и липидов в мозге лабораторных животных с пространственным разрешением до 1 мкм.

- Показано, что волноводный режим нелинейно-оптического взаимодействия, реализуемый в изолированных модах полых фотонно-кристаллических (микроструктурированных) волноводов, приводит к увеличению эффективности четырехволновых взаимодействий по сравнению с режимом жесткой фокусировки. Для нелинейно-оптической спектроскопии газовых сред, заполняющих сердцевину световода, на основе когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) величина подобного увеличения эффективности достигала одного порядка. Впервые показана возможность диагностики аналита (молекул воды), осаждаемых на внутренних стенках полых фотонно-кристаллических (микроструктурированных) волокон с большой площадью моды. Продemonстрировано, что интерферометрическая природа сигнала КАРС обеспечивает возможность анализа вклада оболочки в общую нелинейность волноводных мод полых микроструктурированных волокон, что повышает чувствительность и точность спектральных измерений.

- Продemonстрировано, что техника прямого измерения светового поля X-SEA-F-SPIDER в сочетании с методикой определения спектральной фазы высокочастотного крыла суперконтинуума, генерируемого в полном антирезонансном волноводе, заполненном аргоном при высоком давлении, при накачке фемтосекундными импульсами среднего и ближнего инфракрасного диапазона, обеспечили возможность прямой характеристики субпериодных импульсов, формируемых в процессе солитонной самокомпрессии импульсов накачки.

- Продemonстрирована возможность использования фотонно-кристаллических (микроструктурированных) волокон в качестве эффективного источника квантовых состояний света: фотонных пар и одиночных фотонов. Впервые рассмотрена генерация фотонных пар при кросс-поляризованных полях накачки в процессе векторного четырехволнового взаимодействия (ЧВВ) II типа. Дана количественная характеристика степени спектральной запутанности фотонной пары, как функции дисперсионных свойств фотонно-кристаллического волокна и параметров оптического поля накачки, в частности, центральной длины волны накачки, ее поляризации и мощности. Яркость источника составляет  $8 \times 10^4$  Гц/мВт при средней мощности накачки 2.5 мВт и  $g^{(2)}(0) = 10$ . Полученная яркость значительно превосходит аналогичные параметры СПР-источников фотонных пар ( $\sim 1000$  Гц/мВт). Максимальное значение параметра  $g^{(2)}(0) = 1200$  при скорости счета совпадений 75 Гц без коррекции на потери в схеме и квантовую эффективность детекторов.

- Впервые экспериментально реализован метод линейной квантовой спектроскопии с использованием частотно-коррелированных фотонных пар, полученных на базе

спонтанного ЧВВ в фотонно-кристаллических (микроструктурированных) световодах. Сравнение измеренного спектра с полученным при использовании классического источника света является критерием достоверности результата.

- Экспериментально продемонстрирован высокоэффективный волоконный источник сверхширокополосных бифотонов с рекордной спектральной шириной порядка 180 ТГц на основе спонтанного ЧВВ в фотонно-кристаллическом (микроструктурированном) волокне, накачиваемым фемтосекундными лазерными импульсами. Получение сверхширокополосного спектра достигается при использовании длины волны накачки близкой к одному из двух нулевых значений дисперсии групповых скоростей световода. Проведено сравнение режимов генерации коррелированных фотонных пар при импульсной и непрерывной накачке в области 0.8 мкм, показана возможность генерации междиапазонных фотонных пар в обоих режимах с большой частотной отстройкой в областях около 0.5 и 1.6 мкм.

### **Защищаемые положения**

1. Полые фотонно-кристаллические (микроструктурированные) световоды с диаметром сердцевины 13 – 15 мкм обеспечивают транспортировку мощных нано-, пико- и фемтосекундных импульсов. Передача нано- и пикосекундных импульсов на длине волны 1.06 мкм осуществляется в линейном режиме с допустимыми потоками энергии 0.5 кДж/см<sup>2</sup> и 0.1 кДж/см<sup>2</sup>, соответственно. Транспортировка мультимегаваттных (5-10 МВт) фемтосекундных импульсов в подобных волокнах с сохранением их временных характеристик возможна в режиме солитонного распространения или за счет предварительного линейного chirпирования с последующей компрессией, обеспечиваемой дисперсионными свойствами световода.

2. Дисперсионные и нелинейные свойства полых антирезонансных световодов револьверного типа с диаметром сердцевины 70 мкм, толщиной стенок внутренних капилляров оболочки порядка 500 нм и заполненных инертным газом при высоком давлении, обеспечивают эффективное нелинейно-оптическое преобразование фемтосекундных импульсов накачки ближнего и среднего инфракрасного диапазона с субмиллиджоулевыми уровнями энергий в режиме солитонной самокомпрессии. Подбор давления газа и энергии фемтосекундных импульсов накачки создает условия формирования мультиоктавного суперконтинуума и высокоэнергетичных предельно коротких импульсов с длительностью менее одного цикла поля и пиковой мощностью более 2 ГВт. Такие импульсы находят применение в области аттосекундной оптики и петагерцовой оптоэлектроники.

3. Фемтосекундные лазерные генераторы на основе кристалла Cr:forsterite с центральной длиной волны 1.25 мкм в сочетании с микроструктурированными (МС) волокнами с диаметром сердцевины порядка 5 мкм обеспечивают эффективный и удобный метод получения перестраиваемых фемтосекундных импульсов с мегагерцовой частотой повторения в спектральном диапазоне 1.3 – 1.8 мкм с энергиями в несколько наноджоулей и пиковыми мощностями до 100 кВт в процессе солитонного самосдвига частоты импульсов накачки.

4. Кварцевые микроструктурированные волокна с твердотельной сердцевиной и диаметром порядка 5 мкм обеспечивают гибкое управление спектрально-временным преобразованием импульсов накачки Cr:forsterite генератора с удлиненным резонатором в процессе солитонного самосдвига частоты и нелинейного сужения их спектра (до 6.5 раз). Удвоение частоты перестраиваемых солитонов (1.3 – 1.8 мкм) и импульсов основного излучения хром-форстеритового генератора (1.25 мкм) позволяет получить перестраиваемые фемтосекундные импульсы в диапазоне 600 – 900 нм и субнаноджоулевыми уровнями энергий. Перестраиваемые импульсы в диапазоне 0.6 – 1.8 мкм могут использоваться для различных методов нелинейно-оптической визуализации, как в ближней инфракрасной, так и видимой области спектра.

5. Генерация перестраиваемого излучения в видимой области спектра (400 – 1000 нм) при распространении солитоноподобных импульсов в микроструктурированных волокнах ( $\gamma > 100 \text{ Вт}^{-1}\text{км}^{-1}$ ), изготовленных из стекол с высокой нелинейностью с элементами наноструктурирования, обеспечивается за счет генерации суперконтинуума, фазогласованного возбуждения дисперсионных волн и третьей оптической гармоники при накачке от неусиленных импульсов Cr:forsterite генератора с центральной длиной волны 1.25 мкм.

6. Перестраиваемые фемтосекундные импульсы, получаемые в процессе солитонного самосдвига частоты неусиленных импульсов Cr:forsterite генератора в микроструктурированных волокнах с увеличенной сердцевиной, формируют удобную платформу для реализации сканирующей микроспектроскопии на основе когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). Ее эффективность обеспечивается широким спектральным диапазоном перестройки зондирующих импульсов (0.6 – 1.8 мкм), их высокими уровнями энергий (до нескольких наноджоулей) и возможностью контроля спектрально-временных параметров.

7. Реализация волноводного режима когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) в направляемых модах полых фотонно-кристаллических световодов с диаметром сердцевины 10 - 50 мкм обеспечивает не только многократное повышение эффективности нелинейно-оптической спектроскопии заполняющих его сердцевину газов или осаждаемых на внутренних стенках молекул, но и позволяет измерить вклад микроструктурированной оболочки в общую нелинейность волноводных мод полых фотонно-кристаллических волокон, что повышает точность и спектральное разрешение методики КАРС-спектроскопии.

8. Двухлучепреломляющие высоконелинейные фотонно-кристаллические световоды с двумя нулями дисперсии групповых скоростей обеспечивают управление режимами генерации коррелированных фотонных пар и одиночных фотонов в процессе векторного спонтанного четырехволнового взаимодействия (ЧВВ). В зависимости от центральной длины волны фемтосекундных импульсов накачки, ее поляризации относительно осей волокна и мощности, возможен как режим яркого источника коррелированных фотонных пар со скоростью генерации  $> 10^5 \text{ Гц/мВт}$ , так и источника одиночных провозглашенных фотонов со значением условной корреляционной функции меньшим единицы. Корреляционными свойствами фотонных пар, генерируемых в процессе векторного

спонтанного ЧВВ, можно управлять, создавая как высокочистые низкоразмерные запутанные состояния, так и высокоэнтропийные запутанные состояния в пространстве высокой размерности.

### **Практическая значимость работы определяется следующим**

1. Одной из актуальных задач лазерной физики является расширение спектральной области генерации перестраиваемых лазерных импульсов относительно источников на кристалле Ti:Sapphire, а также поиск более дешевых и технологичных решений. В настоящей работе предлагается подход, связанный с использованием излучения от фемтосекундных лазерных источников на кристалле хром-форстерита и его спектрально-временной трансформации в микроструктурированных световодах, причем разнообразные архитектуры, масштабы и материалы МС волокон позволяют использовать излучение как от усилительных систем, так и непосредственно от генераторов. Перестраиваемое по длине волны излучение формируется в результате солитонного самодвига частоты импульсов накачки, поскольку для центральной длины волны накачки 1.25 мкм реализуются условия аномальной дисперсии групповых скоростей, даже в случае использования волокон с большой площадью моды. Солитонные импульсы обеспечивают перестройку в области 1.3 – 1.8 мкм, а пиковые интенсивности могут достигать мегаваттного уровня. Нелинейно-оптическое преобразование также предполагает генерацию перестраиваемого излучения в видимой области спектра за счет генерации суперконтинуума, излучения дисперсионных волн или третьей оптической гармоники. Эффективным методом также является удвоение частоты импульсов накачки и солитонов в нелинейных кристаллах. Такое разнообразие возможностей обеспечивает технологичную платформу для реализации практических схем нелинейно-оптической спектроскопии и микроспектроскопии объектов различной природы. Реализация этого подхода была найдена практическую демонстрацию в реализации КАРС-микроспектроскопии кремниевых и алмазных элементов, а также нелинейно-оптической визуализации биологических тканей.
2. Волноводное увеличение эффективности нелинейно-оптических взаимодействий и возможности управления свойствами волноводных мод полых фотонно-кристаллических (микроструктурированных) волокон за счет изменения их структуры, открывает возможности значительного повышения чувствительности нелинейно-оптической спектроскопии газовых сред и позволяет снизить требования к энергиям лазерных импульсов в задачах нелинейной спектроскопии, в том числе КАРС-спектроскопии.
3. Повышение энергии и пиковой мощности передаваемых в волоконном формате лазерных импульсов является задачей, обеспечивающей очевидные преимущества для многочисленных научных и технологичных применений, но использование волокон со сплошной твердотельной сердцевиной ограничено лучевой стойкостью материалов. Полые фотонно-кристаллические световоды обеспечивают транспортировку мощных нано-, пико- и фемтосекундных импульсов. Передача фемтосекундных импульсов с субгигаваттной пиковой мощностью и сохранением спектрально-временных характеристик возможна в

различных режимах, а именно в режиме солитонного распространения или режиме с использованием предварительного линейного chirпирования с последующей компрессией, обеспечиваемой дисперсионными свойствами световода. Энергия и мощность передаваемых импульсов удовлетворяет различным технологическим потребностям, связанным с необходимостью доставки мощных световых импульсов в труднодоступные области, что в том числе определяет их применение в медицине (лазерной хирургии, дерматологии или стоматологии).

4. 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 несложностью 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. Например, управление сверхбыстрыми когерентными токами носителей зарядов в полупроводниковых материалах может найти применение для развития сверхбыстрой оптоэлектроники на петагерцовых временных масштабах. Другой областью, где востребованы предельно короткие импульсы с широким когерентным спектром, является фемтохимия, в которой методы многомерной нелинейной время-разрешенной корреляционной спектроскопии позволяют исследовать связь ядерной и электронной подсистем сложных молекулярных комплексов, выявляя отдельные этапы химических реакций, протекающие на фемтосекундных масштабах времени.
5. Большинство экспериментов в области квантовой оптики проводятся с коррелированными фотонными парами и одиночными фотонами. В случае волоконного источника одиночных фотонов и фотонных пар выделяется несколько очевидных преимуществ: (i) создаются наилучшие условия сопряжения и волоконной транспортировки реализуемых квантовых состояний света; (ii) гибкое управление дисперсией волокон обеспечивает возможность широкого управления характеристиками квантовых состояний света; (iii) волоконные технологии имеют высокий потенциал миниатюризации и использования их в схемах в схемах интегральной оптики. В наших исследованиях продемонстрирована универсальная волоконно-оптическая платформа для генерации управляемых квантовых состояний света, основанная на процессе спонтанного четырехволнового взаимодействия (ЧВВ) в специальных типах фотонно-кристаллических волокон. Особенности дисперсионных свойств двулучепреломляющих, высоконелинейных фотонно-кристаллических световодов обеспечивают различные режимы генерации квантовых состояний света в результате векторного спонтанного четырехволнового взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов. Высокая яркость продемонстрированного источника (порядка  $10^5$  Гц/мВт), возможность обеспечения режима генерации провозглашенных одиночных фотонов и контроля степени квантовой запутанности фотонных пар, обеспечивает хороший потенциал их использования для различных протоколов, связанных с квантовыми вычислениями, криптографией или другими приложениями квантовой оптики. Прямое

применение волоконного источника было продемонстрировано в экспериментах по реализации квантовой (фантомной) спектроскопии поглощения.

Работа выполнялась при финансовой поддержке различных научных фондов и организаций. Соискатель выступал в роли руководителя следующих проектов: РФФИ 20-21-00131, 20-52-3046, 18-02-40025, 16-52-53129, 15-32-50041, 15-02-09015, 14-02-02099, 14-02-90469, 13-02-12447, 11-02-12281-офи-м, 11-02-92118-ЯФ, 11-02-92012-ННС\_a, 10-02-90051\_Бел, 09-02-92119 ЯФ, 09-02-12359, 09-02-92677, 08-02-92009-ННС, 09-02-00985-а, 08-02-90061-Бел, ИНД 08-02-92226. РНФ: 22-12-00149.

И в качестве исполнителя: проектов РФФИ 19-29-12062, 19-02-00473, 18-32-20191, 18-29-20031, 17-52-53092, 17-00-00212, 16-52-50069, 16-29-11799, 16-02-00972, 16-02-00843, 15-02-07820, 14-29-07201, 14-29-07182, 14-02-00707, 13-04-40335-Н, 13-02-92115, 13-02-01465, 12-02-33161, 07-02-91215 ЯФ, 07-02-91215, 06-02-16880, 06-02-39011, 05-02-90556 ННС, 04-02-39002, 04-02-81036, 03-02-16929 03-02-20002. Государственных контрактов: №02.434.11.2010 от “25” апреля 2005 г “Создание микроструктурированных оптических волокон для нового поколения преобразователей и передатчиков лазерного излучения и информации“; от № 02.513.11.3040 от “ 22” марта 2007 г “Наноструктурированные световоды для нового поколения источников и преобразователей световых импульсов и оптических сигналов“. № 02.513.11.3331 от 01 августа 2007 г по теме: “Наносветоводные структуры для формирования, передачи и преобразования широкополосных оптических сигналов, микроскопии и поляриметрии ближнего поля, а также нелинейной микроспектроскопии”, № П1130 от 27 августа 2009 г. Нелинейная оптика предельно коротких световых импульсов: новые принципы нанофотоники и оптической диагностики быстропротекающих процессов с фемто- и аттосекундным временным разрешением». Мегагранта Минобрнауки России № 14.Z50.31.0040 «Световодные системы для квантовых технологий».

### **Объем и структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, содержащего защищаемые положения и список работ, пяти оригинальных глав, заключения с выводами и списка литературы. Каждая глава содержит вступление, кратко описывающее ее содержание и направления представленных исследований. Общий объем диссертации 251 страницы, включая 94 рисунков, одну таблицу. Библиография включает 434 наименования на 21 странице.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Представленные в диссертационной работе результаты были получены в результате комплексного подхода, включающие как непосредственно экспериментальные исследования, так и элементы теоретического анализа и численного моделирования. Подобное сочетание обеспечивает не только достоверность результатов и применяемых физических моделей, но и обеспечивает возможность дальнейшего применения реализованных схем для практических применений в различных областях нелинейной микроспектроскопии, сенсорики и квантовой оптики.

Основные результаты диссертации многократно представлялись на различных международных и отечественных научных конференциях и семинарах в форме **устных и приглашенных докладов**:

Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-2001 Baltimore, Maryland, USA CLEO/QELS-2002 Long Beach, California, USA). Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO/Europe-IQEC 2000 Nice, France). International Quantum Electronics Conference (IQEC 2002 Moscow, Russia). International Congress on Photonics in Europe (CLEO/EUROPE - EQEC 2003, CLEO/EUROPE - EQEC 2009, CLEO/EUROPE - EQEC 2019, Munich, Germany). European CARS Workshop/European Conference on Nonlinear Spectroscopy (ECW'2000 Moscow, Russia; ECW/ECNS'2008 Igl, Austria; ECW/ECNS'2009 Frascati, Rome, Italy; ECW/ECNS'2010 Bremen, Germany; ECW/ECNS'2012 Aberdeen, Great Britain). Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'2000 Bordeaux, France; LPHYS'2001 Moscow, Russia; LPHYS'2002 Bratislava, Slovak Republic; LPHYS'2004 Trieste, Italy; LPHYS'2008 Trondheim, Norway; 2008. LPHYS'09, Barcelona, Spain; 2009. LPHYS'11 Sarajevo, Bosnia and Herzegovina). Italian-Russian Symposium on Problems of Laser Physics and Technologies (ITARUS'2000, Palermo, Italy; ITARUS'2001, St. Petersburg, Russia). Finish-Russian Photonics and Laser Symposium (PALS'2009 Tampere, Finland; PALS'2011 St.Petersburg, Russia; PALS'2013 Kuopio Finland). Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks (2008 Athens, Greece). International Conference on Quantum Optics (ICQO'2006 Minsk, Belarus). Advanced Laser Technologies (ALT'2010 Egmond aan Zee, Netherlands; ALT'2016 Galway, Ireland; ALT'2016 Busan, Korea; ALT'22 Москва, Россия; ALT'2023 Самара, Россия; ALT'2024 Vladivostok, Russia). International Conference on Ultrafast Optical Science (UFL'2021, UFL'2022, UFL'2023 Москва, Россия). International Symposium on Topical Problems of Biophotonics (2007, Nizhny Novgorod, Moscow). SPIE Europe Photonics Europe Conference (2008 Strasbourg, France). Topical Meeting on Optoinformatics (2008 St. Petersburg, Russia). Fall School on Raman and CARS microscopy, Cargese, Corsica, France, 2009. Biomedical Molecular Imaging & The Second Molecular Imaging Center Symposium. New Taipei, Taiwan, 2012. Conference on Laser Optics (St.Petersburg, Russia, LO'2000, LO'2002, LO'2004, LO'2008, LO'2012, LO'2024). International Quantum Electronics Conference (IQEC 2002), Moscow, Russia, 2002. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO'01, Minsk, Belarus, (ICONO 2005), St.Petersburg, Russia, 2005. ICONO 2007), Minsk, Belarus, 2007. ICONO/LAT-2010), Kazan, Russia, 2010. ICONO/LAT, Moscow, Russia, 2013, ICONO/LAT 2016, Minsk, Belarus). International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (ICQOQI'2010 Kyiv, Ukraine, 2010). Asian Conference on Ultrafast Phenomena (ACUP'2010 Taipei, Taiwan). International Conference Frontiers of Nonlinear Physics (2013, Nizhny Novgorod, Russia). International Conference Laser Optics (ICLO 2024), St. Petersburg, Russia, 2024. Russian-Taiwan School-Seminar "Nonlinear Optics and Photonics" (2013 Vladimir/Suzdal, Russia). Laser Application in Life Sciences (LALS-2010, Oulu, Finland). Российский Семинар по Волоконным Лазерам (2007 Новосибирск, Россия). Конференция по фотонике и квантовым технологиям (Казань, Россия, 2018, 2019, 2020, 2021). Международная конференция "Фундаментальные проблемы оптики" (ФПО - 2019, Санкт-Петербург, Russia). Всероссийская Диановская конференция по волоконной оптике (2023 Пермь Россия). Международная конференция молодых ученых и специалистов (Оптика'2001, Оптика'2003, Оптика'2009, Санкт Петербург, Россия). Симпозиум по Когерентному Оптическому Излучению Полупроводниковых Соединений и Структур (2007, 2010, 2013 Звенигород, Россия). Научная школа "Нелинейные волны-2022" (2022 Нижний Новгород, Россия).

## Публикации

По теме диссертации опубликовано 96 работ в рецензируемых научных периодических журналах: Optics Letters, Physical Review A, Physical Review E, Applied Physics B: Lasers and Optics, Applied optics, ACS Photonics, Journal of Raman Spectroscopy, Laser Physics, Laser Physics Letters, Optics Communications, , Applied Physics Letters, Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics, Optics Express, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Journal of Modern Optics, Journal of Physics D - Applied Physics, Physics in Medicine and Biology, Journal of Optical Technology, Sensors and Actuators B: Chemical, Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, Журнал экспериментальной и теоретической физики, Квантовая электроника, Российские нанотехнологии, Успехи физических наук. Также получен один патент.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обсуждаются актуальность и современное состояние исследований в области нелинейной оптики фотонно-кристаллических (микроструктурированных) световодов, формулируется цель и задачи исследования, оценивается научная новизна и практическая значимость представленных результатов, а также приводится краткое содержание работы.

В *первой главе* затрагиваются вопросы, связанные со 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, среди этих явлений особое внимание уделено генерации суперконтинуума, как наиболее яркому нелинейно-оптическому явлению. Приведены основные принципы расчета волноводных мод и особенности распространения импульсов накачки в микроструктурированных световодах. В первой главе большое внимание уделено представлению собственных оригинальных результатов, полученных в группе фотоники и нелинейной спектроскопии на ранних стадиях исследований по этой теме.

В *параграфе 1.1* представлены особенности структуры и основные свойства микроструктурированных (фотонно-кристаллических) волокон, которые отличаются по своей архитектуре и волноводным свойствам от стандартных телекоммуникационных волокон, использующих явление полного внутреннего отражения. Оболочка и сердцевина МС волокон изготавливается из материала с одинаковым показателем преломления, а возможность волноводного распространения реализуется за счет структурирования оболочки (в общем случае и сердцевины) отверстиями микронного масштаба. В первых реализованных экземплярах оболочка представляла двумерную периодическую структуру, образованную воздушными отверстиями в стекле, что дало название этому новому типу световодов – фотонно-кристаллические [2].

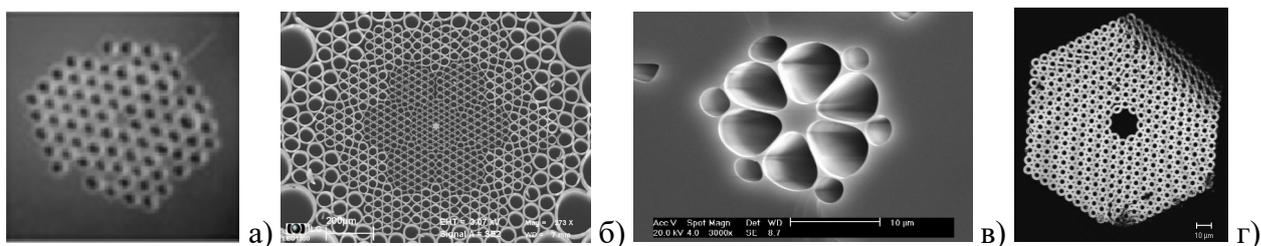


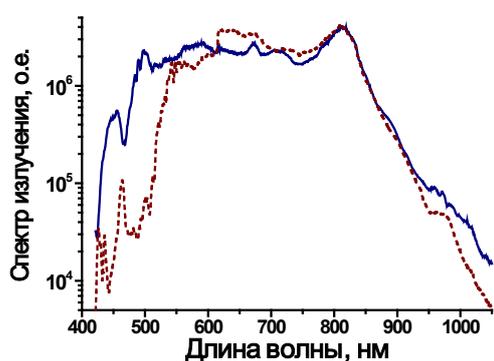
Рис.1. Примеры различной архитектуры микроструктурированных волокон: (а) – фотография первого МС волокна [2]; (б,в,г) – структуры, изготовленные отечественными производителями ТОСС (Саратов) и ГОИ им. С.М.Вавилова (Санкт-Петербург).

Архитектура МС волокон является чрезвычайно разнообразной – размеры сердцевины и капилляров в оболочке изменяются от единиц до десятков микрометров, а набор отверстий в оболочке может представлять либо периодическую структуру, либо вообще состоять из одного цикла отверстий (рис. 1). Особенности структуры задают дисперсионные и нелинейные свойства световодов и определяют характер распространения света в них. В настоящее время потери даже в лучших образцах микроструктурированных волокон еще достаточно сильно превышают потери в стандартных телекоммуникационных волокнах, и речь об их использовании для этих целей пока еще не идет. Но микроструктурированные волноводы уже прочно занимают позиции во многих научных приложениях, связанных с лазерной физикой и нелинейной оптикой. В этом параграфе кратко представлены первые эксперименты, выполненные в нашей группе с волокнами, изготовленными в институте Технологии и обработки стеклянных структур (ТОСС, Саратов). Особенностью этих волокон являлось, что период структуры оболочки был менее 500 нм, что приводило к формированию фотонно-запрещенных зон, соответствующих видимому и ближнему и инфракрасному диапазону. Была показана возможность перестройки положения фотонной запрещенной зоны путем заполнения отверстий оболочки материалом с показателем преломления, отличным от показателя преломления воздуха.

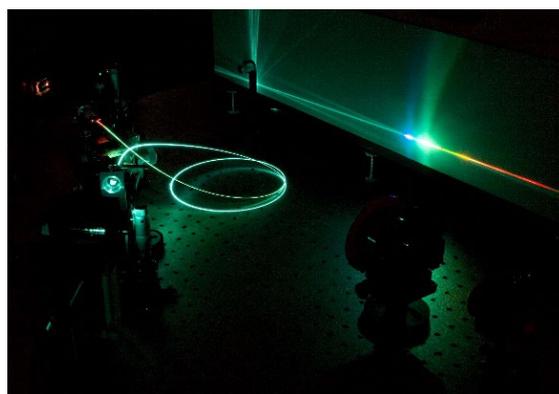
В параграфе 1.2 рассматриваются особенности микроструктурированных световодов, наиболее способствовавших развитию их популярности для волоконной нелинейной оптики. При рассмотрении нелинейно-оптических эффектов в оптических волокнах, прежде всего обычно рассматривают фазовую самомодуляцию (ФСМ), фазовую кросс-модуляцию (ФКМ), процессы четырехволнового смешения (ЧВС), эффективность которых связана с параметром нелинейности  $\gamma$ . Для повышения параметра нелинейности возможно применять высоконелинейные материалы или увеличивать степень локализации излучения в сердцевине волокна. Использование микроструктурированных волокон открывает новые перспективы для управления эффективностью нелинейно-оптических процессов, поскольку за счет изменения строения оболочки и сердцевины можно сильно уменьшить эффективную площадь моды и локализовать излучение в сердцевине. На примере фазовой самомодуляции представлены физические механизмы, приводящие к сильной локализации света за счет изменения процентного содержания воздуха в сердцевине оболочки. Помимо локализации излучения в сердцевине МС волокон,

изменение их структуры позволяет управлять волноводной дисперсией в масштабах, недоступных для стандартных волокон, например сдвигать положение нуля дисперсии групповых скоростей в видимую область. Дисперсионные особенности МС волокон являются вторым фундаментальным фактором, позволяющим управлять эффективностью нелинейно-оптических преобразований.

В параграфе 1.3 продемонстрированы преимущества микроструктурированных световодов для повышения эффективности нелинейно-оптических процессов, в частности генерации суперконтинуума (белого света). Микроструктурированные волокна позволили наблюдать это явление от неусиленных фемтосекундных импульсов. Спектральная ширина излучения суперконтинуума при определенных условиях может составлять несколько октав, что определило широкое применение явления генерации суперконтинуума в оптике предельно коротких импульсов, биофотонике, оптической метрологии. Наибольшие эффективности спектрального преобразования сверхкоротких импульсов в МС волокнах достигаются в режиме аномальной дисперсии, где ключевую роль играют солитонные явления. Для эффективного использования излучения суперконтинуума для различных приложений необходимо не только добиться воспроизводимости и устойчивости временных параметров и спектрального состава генерируемого широкополосного излучения, но и обеспечить высокое качество пространственной моды излучения суперконтинуума. На основе исследования модовой структуры и спектральных свойств излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне (рис.2а) предложен и экспериментально реализован метод пространственно-спектральной фильтрации излучения суперконтинуума, что позволяет использовать излучение суперконтинуума для спектроскопических приложений, оптической метрологии и когерентной томографии. В наших экспериментах также были представлены результаты, демонстрирующие возможности управления начальным чирпом для повышения эффективности генерации суперконтинуума и увеличения его спектральной ширины.



а)



б)

Рис.2. Генерация “белого света” в микроструктурированных волокнах. (а) Спектры излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне с одним циклом отверстий, диаметром сердцевинки 3 мкм и длиной 1.5 м импульсами излучения титан-сапфирового лазера длительностью 40 фс и энергией 2 нДж (пунктир) и 3 нДж (сплошная линия). (б) фотография разложенного в спектр излучения суперконтинуума на выходе микроструктурированного волокна, полученного в нашей лаборатории.

В параграфе 1.4 демонстрируются возможности использования перетянутых волокон для повышения эффективности генерации суперконтинуума. В таких волокнах с микронным размером сердцевины, по существу, отсутствует оболочка и создаются условия наибольшей локализации поля. В параграфе демонстрируются возможности спектрального свехуширения неусиленных фемтосекундных импульсов лазера на хром–форстерите с центральной длиной волны 1.25 мкм в перетянутых волокнах. Генерация суперконтинуума с шириной спектра, превышающей две октавы, наблюдалась при заведении в волокно длиной 90 мм с диаметром перетяжки порядка 2 мкм импульсов длительностью 40 фс и энергией от 0.6 нДж. Однако, особенности эксплуатации этих волокон оказываются достаточно сложными и подавляющее большинство экспериментов по нелинейно-оптическому преобразованию импульсов осуществляется со «стандартными» архитектурами микроструктурированных (фотонно-кристаллических) волокон, а перетянутые волокна используются в качестве сенсоров газовых или жидких сред.

В параграфе 1.5 представлены особенности строения и применения полых фотонно-кристаллических световодов. Увеличение энергии и мощности лазерных импульсов, передаваемых через волокно, ограничено порогом пробоя материала. Для радикального увеличения энергии импульсов возможно использование световодов с полый сердцевиной (капилляров), заполняемых различными газами. Однако, в капиллярах принципиально невозможно выполнить условия полного внутреннего отражения. Соответственно, для поддержания волноводного режима распространения света в сердцевине нужно создать принципиально иные физические механизмы, что и достигается в фотонно-кристаллических световодах за счет периодического структурирования оболочки (рис.1г). Благодаря своим особенностям, полые ФК волокна могут служить удобным и уникальным инструментом для транспортировки и спектральных преобразований лазерных импульсов в волноводном режиме с мультигигавтными уровнями мощностей.

Другим важным свойством полых ФК волокон является то, что они позволяют добиться значительного увеличения эффективности нелинейно-оптического взаимодействия излучения с веществом (жидкостью или газом), заполняющим полую сердцевину. Волноводный режим распространения излучения обеспечивает увеличение длины взаимодействия импульса (или импульсов) с веществом, что позволяет на несколько порядков повысить эффективность взаимодействия по сравнению с режимом жесткой фокусировки.

В параграфе 1.6. представлены физические принципы волноводного увеличения эффективности нелинейно-оптических процессов. Свойства микроструктурированных световодов обеспечивают существенное увеличение эффективности за счет высокой степени локализации электромагнитного излучения в волноводных модах микроструктурированных волокон, что было представлено в настоящем параграфе. Диссертационная работа включает в основном экспериментальные результаты. Однако, интерпретация и понимание процессов спектрально-временного преобразования импульсов в микроструктурированных волокнах были бы невозможны без теоретического

анализа, который можно условно разделить на две части: во-первых, это анализ собственных мод микроструктурированных световодов, в результате которых определяются их дисперсионные и нелинейные характеристики, и во-вторых, непосредственно численный анализ распространения излучения в световодах, который включает различные физические механизмы и явления, ответственные за спектрально-временные преобразования. Для анализа световодов со сложной структурой распределения профиля показателя преломления обычно применяется ряд приближенных численных методов: конечных разностей во временной области, многократного рассеяния, локализованных функций или разложения по плоским волнам. Каждый из перечисленных методов обладает достоинствами и недостатками, и применяется в зависимости от специфики задачи. На распространение сверхкороткого лазерного импульса в оптическом волокне влияют как линейные (затухание, дисперсия), так и нелинейные эффекты (фазовая самомодуляция, рамановское (комбинационное) рассеяние, параметрические процессы на нелинейности третьего порядка, генерация третьей гармоники, самоискривление заднего фронта импульса, ионизация, плазменная нелинейность и поглощение). Эти процессы приводят к изменению как профиля импульса во времени, так и его спектрального состава. Моделирование распространения сверхкоротких импульсов в волокне выполнялось на основе одномерного обобщенного нелинейного уравнения Шредингера (ОНУШ). При изложении материалов диссертационной работы, сравнении экспериментальных и теоретических результатов используются результаты численного анализа.

Во *второй главе* описаны основы экспериментальной техники, использованной при выполнении исследований. В большинстве случаев принципиальная схема экспериментов по нелинейно-оптическому преобразованию лазерных импульсов в микроструктурированных волокнах выглядит достаточно просто: излучение накачки с определенными характеристиками с помощью линз или объективов заводится в микроструктурированный световод. При распространении импульсов в световоде возникают линейные и нелинейно-оптические эффекты, которые проявляются в изменении спектрально-временных, пространственных и модовых характеристик излучения и анализируются с помощью соответствующих приборов или методик. В главе описаны лазерные комплексы, кратко даны их основные технические свойства. Представлены основные методики и технологии изготовления микроструктурированных световодов, а также пример анализа их линейных и дисперсионных свойств. Здесь же дается обзор используемой измерительной техники и методик характеристики особенностей спектрально-временных преобразований лазерных импульсов.

В *параграфе 2.1* представлены основные элементы используемой лазерной техники. Для экспериментального исследования нелинейно-оптических преобразований в микроструктурированных волноводах прежде всего требуется наличие импульсных лазерных источников. В работе были использованы различные лазерные системы, которые имелись непосредственно в распоряжении нашей группы в МГУ имени М.В.Ломоносова и Российском Квантовом Центре (ООО «МЦКТ») или использовались в рамках совместных работ с российскими коллегами в Центре Фотохимии РАН, Казанском квантовом центре

КНИТУ-КАИ или зарубежными группами в университете г. Эссен (Германия) и Международного лазерного центра Братиславы (Словакия).

При проведении экспериментов с высоконелинейными микроструктурированными волокнами со сплошной сердцевиной обычно достаточно использования излучения Ti:Sapphire генераторов. В этом случае импульсы обладали следующими характерными параметрами – центральная длина волны 800 нм, область перестройки в пределах 720 – 870 нм, частота повторения порядка 100 МГц (соответствует длине резонатора порядка одного метра), энергия импульса до 10-15 нДж (средняя мощность до 1 Вт), длительность импульса варьировалась от 30 до 120 фс. Однако при работе со световодами с увеличенной сердцевиной или полыми фотонно-кристаллическими волокнами требуются импульсы с гораздо большей энергией, что диктует необходимость использования многопроходных или регенеративных систем на основе принципа усиления чирпированных импульсов.

Особое значение в наших исследованиях играли фемтосекундные лазеры (различные модификации генераторов и системы с усилением) на основе кристалла хром-форстерита ( $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ). Центральная длина волны хром-форстеритовых источников лежит в области 1.25 мкм, что соответствует нулю дисперсии групповых скоростей (ДГС) для плавленого кварца, что позволяет достигать солитонных режимов распространения импульсов в микроструктурированных волноводах со сплошной сердцевиной и большой площадью моды. В этом параграфе также кратко представлены характеристики нано- и пикосекундных Nd:YAG систем, иттербиевых фемтосекундных источников и оптических параметрических усилителей, используемых в экспериментах.

В *параграфе 2.2* представлены методы изготовления и основная классификация микроструктурированных световодов. Можно выделить четыре основных типа фотонно-кристаллических (микроструктурированных) световодов: MC волокна со стеклянной (сплошной) сердцевиной и оболочкой с воздушными каналами, волокна с набором интегрированных световодных каналов, перетянутые и полые ФК волокна. В настоящее время производство MC световодов осуществляется несколькими компаниями в Англии, США, Дании, Австралии и Китае и такие волокна являются коммерчески доступным продуктом. В нашей стране микроструктурированные волокна изготавливаются (или изготавливались) в ГОИ им. С.М.Вавилова в Санкт-Петербурге, Институте технологий и обработки стекла (ТООС) в Саратове и Научном центре волоконной оптики Института Общей Физики имени А.М.Прохорова РАН в Москве.

В исследованиях, проводимых в группе фотоники и нелинейной спектроскопии МГУ им. М.В.Ломоносова и представляемых в рамках настоящей работы, использовались в основном отечественные микроструктурированные волокна. Однако, нельзя не отметить, что несколько образцов различных типов ФК волокон было предоставлено группами Ф.Рассела и университета г.Тянджин в рамках совместных исследований, и также использовалось коммерческое волокно модели NL-PM-750 (NKT-Photonics).

В *параграфе 2.3* представлен анализ свойств микроструктурированных световодов для повышения эффективности четырехволновых взаимодействий. В общем случае расчет

распределения поля, модового состава, нелинейных и дисперсионных свойств микроструктурированных световодов представляет сложную задачу, требующую применения различных численных методов. Однако, для определения базовых свойств часто бывает достаточно проведения относительно несложного анализа и расчета, который позволяет оценить основные особенности дисперсии и нелинейности микроструктурированных волокон. Для фундаментальной моды  $HE_{11}$  постоянная распространения  $\beta(\omega)$  и нелинейность  $\gamma_s$  достаточной точностью совпадает с параметрами стандартного световода радиусом сердцевины  $a$  со ступенчатым показателем преломления, у которого показатель преломления сердцевины  $n_{core}(\omega)$ , а эффективный показатель преломления оболочки задается как  $n_{clad}(\omega) = f + (1 - f)n_{core}(\omega)$ , где  $f$  - коэффициент заполнения оболочки воздухом. В параграфе представлены результаты расчета применительно к определению оптимальных характеристик волокна для процесса спонтанного ЧВВ от Ti:Sapphire генератора фемтосекундных импульсов. На рис. 3 в логарифмическом масштабе приведены примеры рассчитанных карт фазового согласования  $l_c = \pi/\Delta k$  процесса скалярного ЧВВ. При заданной длине волны накачки эти карты позволяют найти длины волн, на которых возможна эффективная генерация коррелированных фотонных пар на частотах сигнальной и холостой волны.

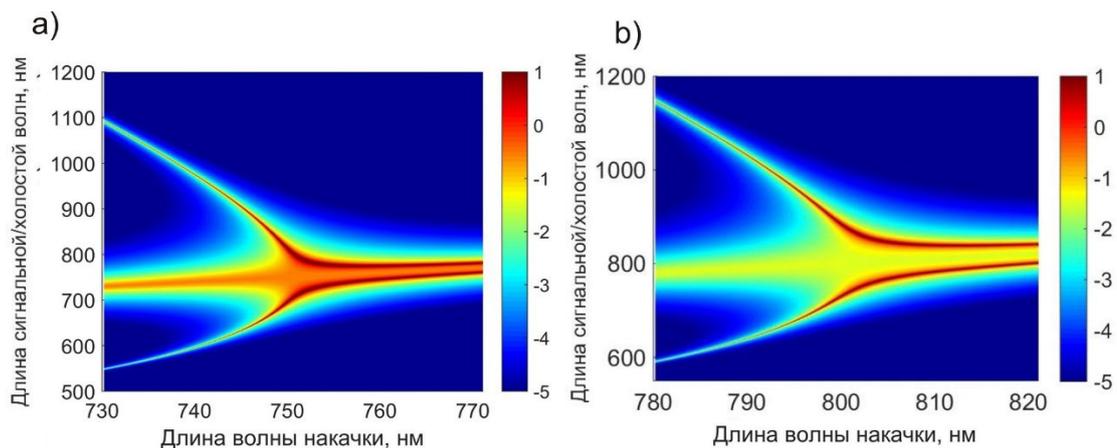


Рис. 3. Карты фазового согласования скалярного ЧВВ в ФК волокнах. (a)  $a = 0.9$  мкм,  $f = 0.7$ ; (b)  $a = 1.2$  мкм и  $f = 0.9$

В параграфе 2.4 представлены экспериментальные методы характеристики нелинейно-оптического преобразования в микроструктурированных световодах. В качестве регистрирующей аппаратуры использовались автоматизированные спектрометры для ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазона производства компаний ЛОМО (Россия, СССР), Ocean Optics (США), Solar LS (Беларусь). Для сбора и анализа оптического сигнала использовались различные методы: накопления и усреднения, электронного стробирования (BOXCAR), синхронного детектирования. При этом измерение энергетических характеристик импульсов проводилась с помощью сертифицированных измерителей мощности и энергий лазерного излучения (Thorlabs, Coherent), что позволяло оценить эффективность преобразования в абсолютных значениях. Такое разнообразие техники и методов позволяло аккуратно оценивать амплитудно-

спектральные характеристики как импульсов, получаемых в различных лазерных системах, так и импульсов, регистрируемых после прохождения различных типов микроструктурированных световодов.

В измерениях сверхкоротких импульсов наиболее ответственной и принципиально сложной частью является анализ их временных и спектрально-фазовых характеристик. В наших работах мы использовали автокорреляционные методы, различные варианты техники на основе оптического стробирования с разрешением по частоте FROG (Frequency Resolved Optical Gating). Для характеристики предельно коротких импульсов, формируемых с помощью полых фотонно-кристаллических волноводов, использовалась техника прямого восстановления поля методом спектральной пространственной интерферометрии (X-SEA-F-SPIDER).

В *третьей главе* представлены результаты исследований по реализации источника перестраиваемого излучения на основе нелинейно-оптического преобразования фемтосекундных импульсов накачки в микроструктурированных волокнах со сплошной твердотельной сердцевиной, в том числе с элементами наноструктурирования, изготовленных из различных материалов. При этом основное внимание уделяется использованию импульсов накачки с частотой, лежащей в области центральной длины волны 1.25 генерации хром-форстеритовых лазерных источников, что обеспечивает возможность солитонного режима распространения импульсов для широкого спектра архитектур микроструктурированных световодов.

В *параграфе 3.1* представлены базовые соотношения для солитонных эффектов. При распространении лазерных импульсов в оптическом волокне возможно формирование солитонов при определенном соотношении дисперсионных и нелинейных эффектов. Одним из основных условий для поддержания солитонного режима распространения является наличие аномальной дисперсии волокна. При уменьшении длительности лазерных импульсов влияние запаздывающей нелинейности, а также эффектов дисперсии высоких порядков, начинает стремительно усиливаться. В результате их воздействия солитон перестает быть устойчивым, что проявляется в его делении на фундаментальные солитоны с последующим постепенным сдвигом их центральной частоты в длинноволновую область спектра - явлению, которое носит название солитонного самосдвига частоты (ССЧ), которое может сопровождаться процессом излучения дисперсионных волн, интерпретируемый как аналог черенковского излучения. Солитонные режимы распространения в фотонно-кристаллических волокнах со сплошной и полый сердцевиной открывают возможности управления нелинейно-оптическими взаимодействиями в режиме изолированных волноводных мод, что позволяет значительно повысить эффективность преобразования частоты и трансформации спектра фемтосекундных лазерных импульсов.

В *параграфе 3.2* представлены спектрально-временные преобразования импульсов генератора на кристалле хром-форстерита с центральной длиной волны 1.25 мкм в микроструктурированных световодах с увеличенной сердцевиной в процессе солитонного самосдвига частоты (ССЧ). Микроструктурированные волокна обеспечивают существенное увеличение скорости ССЧ за счет высокой степени концентрации лазерного

излучения в сердцевине МС-волокна с малой площадью поперечного сечения [58–60]. Центральная длина волны генерируемых солитонов на выходе из световода зависит от коэффициента нелинейности, дисперсии и длины волокна, а также энергии, длительности и chirpa входных лазерных импульсов. Ключевая идея увеличения мощности и энергии солитонов на выходе из МС волокна заключается в изменении архитектуры МС волокна, которая связана с увеличением его сердцевины и обеспечением достаточно ровной дисперсионной кривой. Для достижения эффективного спектрального преобразования неусиленных фемтосекундных лазерных импульсов за счет ССЧ было использовано МС волокно с диаметром твердотельной сердцевины  $d \approx 5$  мкм. Эффективная площадь моды была оценена как  $20 \text{ мкм}^2$ , а параметр нелинейности  $\gamma \approx 10 \text{ ВТ}^{-1} \text{ км}^{-1}$ .

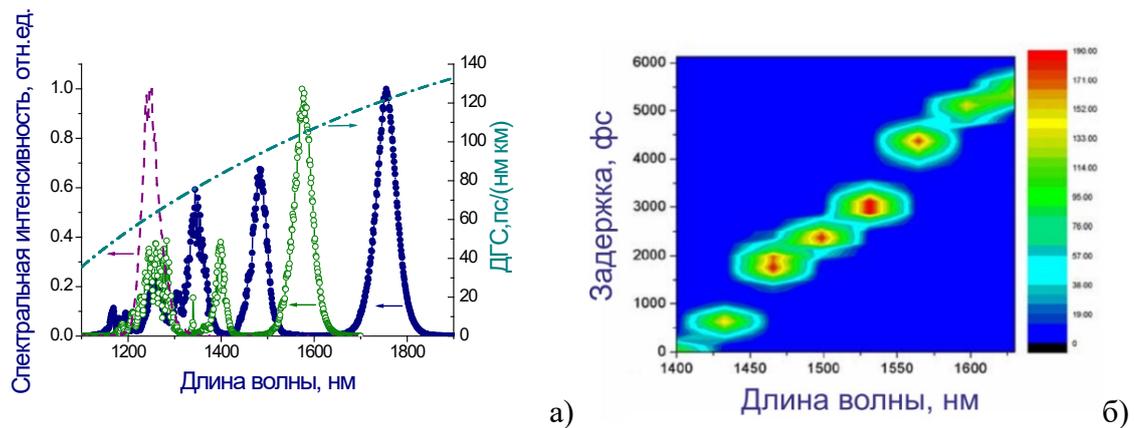


Рис.4. (а) Спектр высокоэнергетичных солитонов на выходе из ФК волокна для лазерных импульсов с длительностью 55 фс и энергией 5 нДж (полые кружки) и 7 нДж (заполненные кружки). Входной спектр излучения хром-форстеритового лазера изображен пунктиром. Дисперсия групповых скоростей (ДГС), как функция длины волны, изображена штрих-пунктирной линией. На вставке изображен поперечный срез волокна. (б) Спектрохронограмма изменения длины волны временной задержки солитона относительно импульса из лазера накачки от его центральной длины волны.

Источником лазерной накачки, использовавшийся в наших экспериментах, является лазер на кристалле хром-форстерита с удлиненным резонатором, позволяющим получать 40-70 фс импульсы на центральной длине волны 1,25 мкм с максимальной энергией до 25 нДж. Лазерные импульсы заводились в МС волокно с помощью микрообъективов, обеспечивающих максимальную эффективность заведения на уровне 35-40%. Импульсы накачки формировали перестраиваемые по длине волны солитоны благодаря описанному явлению солитонного самосдвига частоты. Например, спектрально сдвинутый солитон с центром на длине волны 1770 нм имел энергию 2.9 нДж при длительности импульса 35 фс, что соответствует пиковой мощности 83 кВт (рис. 4а). В ходе выполнения экспериментов показана возможность генерации перестраиваемых по частоте солитонов в диапазоне длин волн от 1300 до 1800 нм и длительностью 30 – 70 фс (рис. 4б). Результаты численного анализа хорошо согласуется с экспериментальными данными, и предсказывают возможность масштабирования энергии перестраиваемых солитонов до мегаваттного уровня пиковых мощностей.

В параграфе 3.3 рассмотрены различные возможности генерации перестраиваемого излучения в видимом диапазоне в процессе генерации суперконтинуума и солитонного

самосдвига частоты в микроструктурированных волокнах. Диапазоны управления дисперсией, пространственным профилем поля и нелинейностью МС волокон могут быть существенно расширены за счет использования системы воздушных отверстий с нанометровыми размерами, модифицирующих сердцевину световода. В наших исследованиях было показано, что система воздушных отверстий с диаметром 100 - 500 нм в сердцевине МС волокна позволяет сформировать профиль дисперсии и пространственного распределения электромагнитного поля, обеспечивающих эффективное преобразование частоты фемтосекундных импульсов хром-форстеритового лазера в спектральном диапазоне от 0.45 до 1.0 мкм за счет фазосогласованного излучения дисперсионных волн. Другим процессом, приводящим к генерации перестраиваемого излучения в видимой области спектра, является генерация третьей гармоники (ГТГ). На рис.5а,б представлены результаты экспериментального исследования процесса ГТГ в МС световодах, иллюстрирующие наиболее важные свойства явления ГТГ в поле солитонной накачки. Центральная длина волны излучения хром-форстеритового лазера лежит в области аномальной дисперсии МС-волокна. Солитон, формируемый в волокне лазерным импульсом, испытывает низкочастотный сдвиг и при этом создаются условия для эффективной генерации третьей гармоники, приводящей к появлению интенсивных изолированных пиков в спектральной области 380 – 550 нм (рис. 5б).

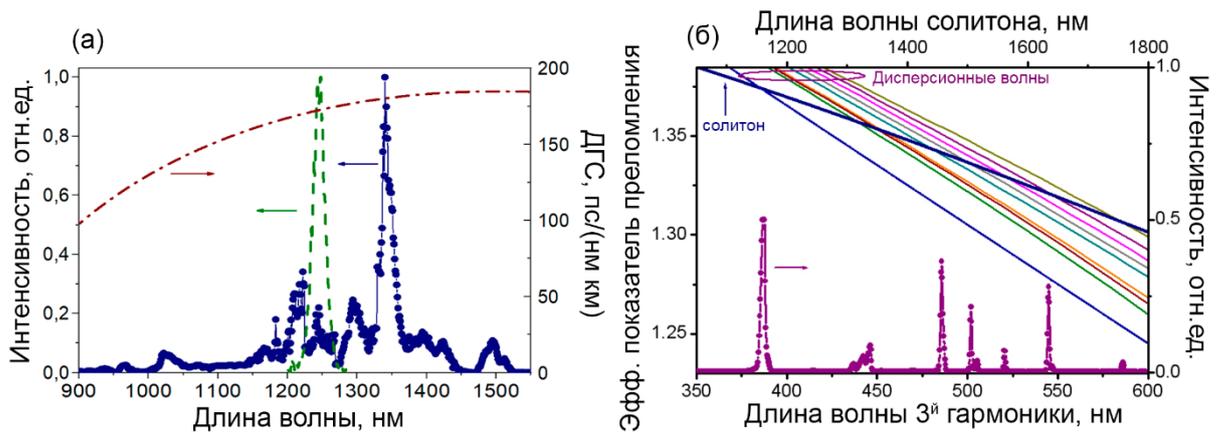


Рис.5. (а) Спектральный профиль дисперсии групповой скорости (штрих-пунктирная кривая) МС-световода. Спектр фемтосекундного импульса хром-форстеритового лазера (0.5 нДж) на входе и выходе МС-световода длиной 12 см. (б) Спектр на выходе МС-световода длиной 30 см от импульса накачки с длительностью 120 фс и энергией 2 нДж. Утолщенной сплошной линией показана зависимость эффективного показателя преломления солитона  $n_{sol}$  от длины волны (солитон распространяется в основной моде МС-волокна). Тонкими сплошными линиями показаны зависимости эффективных показателей преломления  $n_m$  различных волноводных мод высокого порядка.

Частоты, на которых наблюдаются эти пики, с высокой точностью согласуются с частотами, на которых достигается равенство эффективных показателей преломления солитона  $n_{sol}(\omega)$  и одной из волноводных мод на частоте  $3\omega$ . Состав спектра третьей гармоники на выходе МС световода может перестраиваться путем изменения параметров импульса накачки. В этом параграфе также представлены результаты по эффективной

генерации излучения в видимой области спектра в МС волокнах с элементами наноструктурирования и двойной сердцевиной, изготовленных из различных типов высоконелинейных стекол.

В *параграфе 3.4* представлены вопросы управления спектральным и временным профилем импульсов в процессе солитонного самосдвига частоты в микроструктурированных световодах со сплошной сердцевиной. Анализ особенностей солитонной динамики сверхкоротких световых импульсов в микроструктурированных световодах с высокой нелинейностью позволяет указать пути формирования импульсов электромагнитного излучения с длительностью, близкой к периоду светового поля. В наших работах было показано, что сдвинутые по частоте солитоны на выходе из высоконелинейного МС волокна приводят к образованию в выходном спектре интерференционных полос высокой видности, что указывает на гладкий спектральный профиль каждого отдельного солитона и обеспечивает возможность формирования в режиме синхронизации мод импульсов с длительностью короче, чем длительность  $T_m$  любого солитона, генерируемого на выходе из волокна, что в нашем эксперименте предполагает получение импульса длительностью порядка 24 фс.

С другой стороны, для многих спектроскопических приложений ширины спектров зондирующего излучения должны быть точно согласованы с параметрами исследуемого объекта. В ходе исследований мы продемонстрировали, что фемтосекундные лазерные импульсы могут быть спектрально сжаты в режиме солитонного самосдвига частоты (ССЧ). При использовании неусиленных импульсов хром-форстеритового лазера с длительностью 50 фс в качестве импульсов накачки, генерируемые солитоны смещались в “красную” область на длину волны 1,58 мкм. При этом происходило сужение спектральной линии солитона, и был достигнут коэффициент спектрального сжатия 6,5 относительно ширины спектра начального импульса.

Таким образом, было показано, что сдвинутые по частоте солитоны, генерируемые в высоконелинейном МС волокне могут с одной стороны, синтезировать импульсы в несколько циклов светового поля, а с другой стороны возможна спектральная компрессия ультракоротких лазерных импульсов. Такое разнообразие делает микроструктурированные световоды удобной платформой формирования импульсов для целей нелинейной спектроскопии.

В *параграфе 3.5* показана возможность получения перестраиваемых по частоте мегаваттных фемтосекундных импульсов ИК-диапазона на основе генерации излучения суперконтинуума в многосолитонном режиме, реализуемом в МС световодах с большой площадью моды. Уникальная особенность МС световодов с большой площадью моды заключается в том, что такие волноводы позволяют обеспечить преимущественно одномодовый режим передачи излучения с большим диаметром пучка. Волноводная дисперсия для МС волокон с большой площадью сердцевины значительно слабее материальной, что ограничивает возможность управления дисперсией групповых скоростей и положение нуля ДГС определяется материальной дисперсией кварцевого стекла в области 1.25 мкм. В экспериментах для оптической накачки использовалась

система с усилителем на кристалле Cr:forsterite с центральной длиной волны 1.25 мкм, а для анализа процессов нелинейно-оптического преобразования импульсов накачки в расширенном спектральном диапазоне применялась также Ti:Sapphire фемтосекундная лазерная система и оптический параметрический усилитель, позволяющие генерировать перестраиваемый импульсы в области 1.1 – 1.5 мкм с энергиями до десятков микроджоулей.

Были использованы МС волокна с диаметром сердцевины 22 мкм, что соответствовало эффективной площади моды  $380 \text{ мкм}^2$ , а нелинейный коэффициент оценивался как  $\gamma \approx 0.7 \text{ Вт}^{-1}\text{км}^{-1}$ . Энергия вводимых в МС световод лазерных импульсов в условиях описываемых экспериментов варьировалась в диапазоне от 0.01 до 2.0 мкДж. Распространение импульсов с такими энергиями в режиме аномальной дисперсии сопровождается формированием множественных солитонов. Дисперсия высоких порядков приводит к неустойчивости солитонов относительно излучения дисперсионных волн в видимой части спектра, формирующих ярко выраженные пики в спектрах выходного излучения (рис.6).

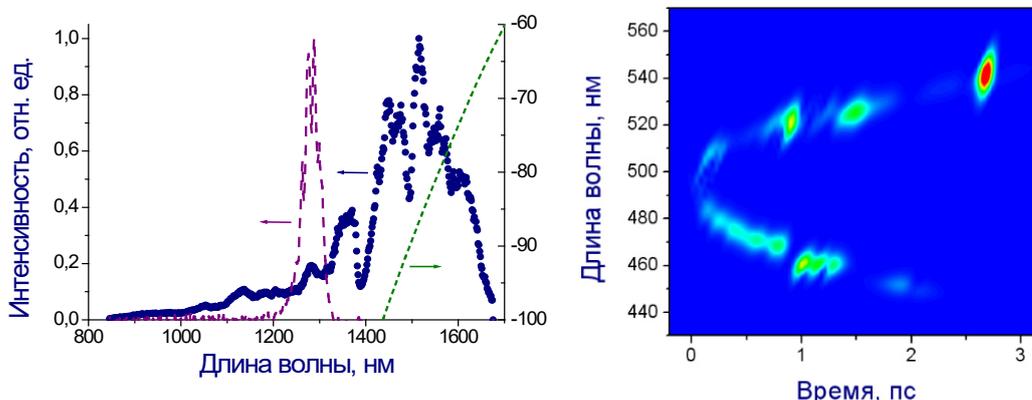


Рис. 6. Спектр лазерного импульса на входе в МС-световод (штриховая линия), спектр излучения на выходе МС-световода (точки), зависимость дисперсии групповой скорости (ДГС) от длины волны для пластины теллуричного стекла, используемой для компрессии импульсов (пунктирная линия). Спектрохронограмма сигнала, формируемого на выходе МС-световода, начальная энергия импульса на входе в световод 100 нДж.

Временная структура поля при этом оказывается достаточно сложной и позволяет осуществить эффективную временную компрессию только определенной части спектра. Частичная компенсация чирпа с помощью пластины из теллуричного стекла преобразует излучение многосолитонного суперконтинуума в последовательность световых импульсов, наиболее мощный из которых имеет центральную длину волны 1520 нм, длительность 210 фс и энергию, определяющую пиковую мощность порядка 1 МВт.

Нами также использовался необычный тип МС волокна с полностью твердотельной структурой. Оболочка состояла из периодических рядов стержней, допированных диоксидом германия. Волокно с диаметром сердцевины 19 мкм и коэффициентом нелинейности  $\gamma \approx 0.6 \text{ км}^{-1}\text{Вт}^{-1}$  поддерживало распространение в области фундаментальной фотонно-запрещенной зоны оболочки в диапазоне от 930 до 1300 нм, и обеспечивало эффективное уширения спектра лазерных импульсов на центральной длине волны 1140 нм с пиковой мощностью порядка 3 МВт. Путем компенсации чирпа широкополосного

излучения с помощью призмного компрессора удалось получить импульсы в ближнем ИК диапазоне длительностью 20 фс и пиковой мощностью 20 МВт. При этом полная спектральная ширина излучения на выходе МС волокна теоретически обеспечивает сжатие до длительностей порядка двух циклов поля.

В *главе 4* рассматриваются особенности распространения и нелинейно-оптического преобразования мощных лазерных импульсов в полых фотонно-кристаллических волноводах. Полые фотонно-кристаллические (ФК) волноводы позволяют сформировать устойчивые изолированные пространственные направляемые моды мощных сверхкоротких световых импульсов и осуществить эффективные нелинейно-оптические преобразования таких полей в режимах, близких к одномодовому. В *главе* рассмотрены вопросы, касающиеся исследования свойств и возможности применения полых фотонно-кристаллических волокон в актуальных задачах транспортировки и нелинейно-оптической компрессии мощных лазерных импульсов видимого, ближнего и среднего инфракрасного диапазона.

В *параграфе 4.1* изложены вопросы транспортировки лазерных импульсов различной длительности и энергий в сердцевине полых фотонно-кристаллических (ФК) волнопроводов. Структура использованных в наших экспериментах полых ФК волокон включает оболочку в виде периодической гексагональной фотонно-кристаллической решетки и полую заполненную воздухом сердцевину диаметром 13 - 15 мкм. Для транспортировки импульсов использовалось излучение основной длины волны нано- и пикосекундного Nd:YAG лазера. Была экспериментально продемонстрирована возможность распространения в одномодовом режиме пико- и наносекундных лазерных импульсов субмиллиджоулевого уровня с потоком энергии более 500 Дж/см<sup>2</sup>. Таких значений было достаточно для осуществления практических задач, в том числе лазерной стоматологии. Передача мощных фемтосекундных импульсов представляет собой еще более привлекательную задачу. Однако, волноводная дисперсия в полых ФК волноводах может вызывать удлинение сверхкоротких лазерных импульсов. Отрицательное предчирпирование импульсов помогает решить эту проблему, поскольку аномальные дисперсионные свойства волноводных мод ФК волокна обеспечивают компенсацию наведенного чирпа. Этот подход продемонстрирован с использованием фемтосекундных импульсов с длиной волны 1070 нм, которые компрессировались до начальной длительностей порядка 110 фс, что обеспечило пиковую мощность порядка 5 МВт при энергии импульса 0.55 мкДж.

Также в этом параграфе был продемонстрирован принципиально иной подход к транспортировке сверхкоротких импульсов через полое ФК волокно. Было показано, что использование солитонных режимов передачи фемтосекундных импульсов через полые ФК-волокна позволяет существенно повысить пиковую мощность передаваемых сверхкоротких лазерных импульсов. Экспериментальные и теоретические результаты показывают возможность реализации солитонного режима передачи импульсов второй гармоники хром-форстеритового лазера с центральной длиной волны 615 нм, длительностью около 100 фс и энергией 0.2 – 1 мкДж в полых фотонно-кристаллических

волокнах. Мощность солитонов, формируемых в условиях описываемых экспериментов, на три-четыре порядка превышает мощность солитонов в обычных кварцевых световодах.

В параграфе 4.2 представлены нелинейно-оптические преобразования импульсов ближнего и среднего инфракрасного диапазона в полых антирезонансных фотонно-кристаллических волноводах револьверного типа для формирования мультиоктавного суперконтинуума и предельно коротких гигаваттных импульсов. Эффект антирезонанса на субмикронных стенках капилляров, составляющих оболочку волокна, и их отрицательная кривизна позволяют достичь низких потерь при распространении излучения, которые оценивались как 10 дБ/км в спектральных полосах, шириной несколько октавы. Эксперименты проводились с использованием фемтосекундной иттербиевой лазерной системы в Российском Квантовом Центре (ООО «МЦКТ») и многофункциональной Ti:Sapphire лазерной системой с оптическим параметрическим усилителем в МГУ им. М.В.Ломоносова. Фемтосекундные импульсы на длинах волн 3.2 и 1.8 мкм с энергиями порядка 50 – 100 мкДж фокусировались на входной торец полого антирезонансного фотонно-кристаллического волокна с оболочкой в виде одного кольца тонкостенных капилляров, заполненных аргоном с давлением в несколько атмосфер. При распространении импульсов формировался мультиоктавный суперконтинуум, простирающийся от 300 нм до 4.2 мкм (рис.7).

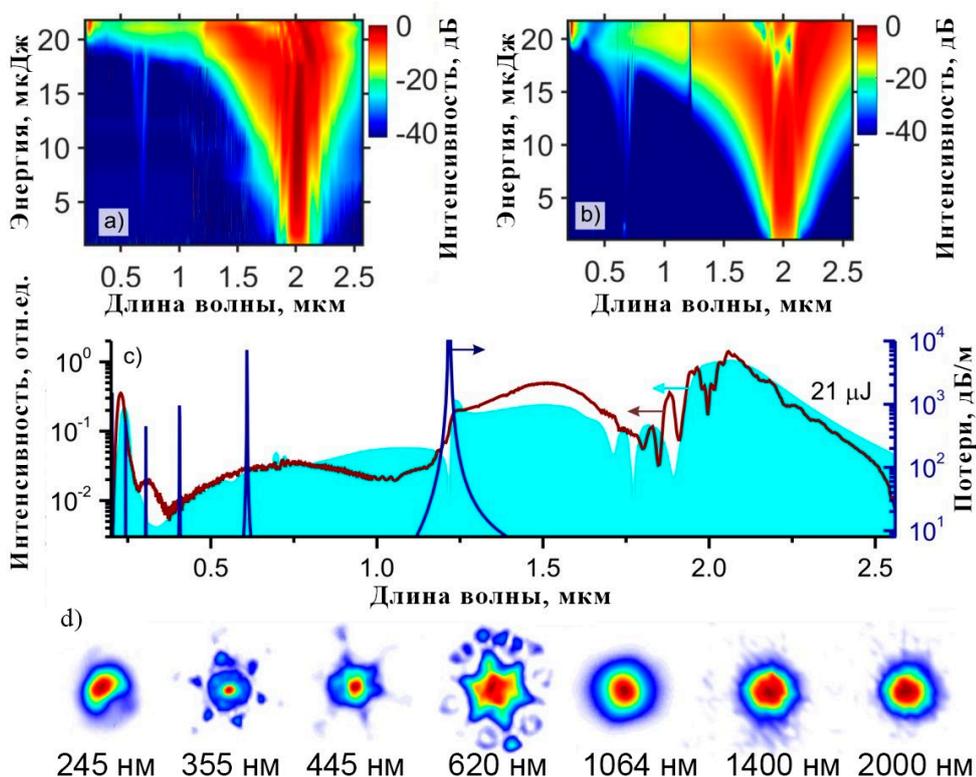


Рис.7. (а) Экспериментальные и (b) теоретические зависимости спектра суперконтинуума на выходе из волновода от энергии импульса на входе. (с) Экспериментальный (коричневая кривая) и расчетный (голубая заливка) спектр суперконтинуума при энергии 21 мкДж. Темно-синей линией обозначены рассчитанные потери полого фотонно-кристаллического волокна. (d) Поперечные моды выходного излучения в разных спектральных диапазонах с указанными центральными длинами волн.

Анализ спектра излучения на выходе волновода, измеренного в широком спектральном диапазоне в зависимости от энергии импульса накачки и давления газа внутри волокна, показал, что образование столь протяженного мультиоктавного суперконтинуума происходит при формировании предельно короткого в результате солитонной самокомпрессии, усиленной образованием ударной волны огибающей. Реализованная методика прямого измерения светового поля техникой X-SEA-F-SPIDER, а также исследование спектральной фазы высокочастотного крыла суперконтинуума, распространяющегося в фундаментальной моде волновода на основе регистрации широкополосной  $f-3f$  интерференции при варьировании фазы несущей относительно огибающей импульса накачки, позволила говорить о формировании импульсов с длительностью менее одного цикла поля с центральной длиной волны в области 2 мкм. Энергия сжатого импульса на выходе волновода составляла порядка 10 мкДж, что дает оценку пиковой мощности порядка 2 ГВт.

В *Главе 5* рассмотрены различные приложения фотонно-кристаллических световодов в задачах нелинейной спектроскопии и микроспектроскопии, биовизуализации и квантовой оптики. Эффективность спектральных методов, основанных на четырехволновых процессах определяется когерентной длиной взаимодействия, и очевидным решением в этом направлении является использование волноводного режима распространения участвующих в процессе импульсов, что обеспечивается в полых фотонно-кристаллических волокнах, и делает их перспективными кандидатами для элементов сенсорики газовых сред и жидкостей. Другое направление решаемых задач неразрывно связано с результатами третьей главы, поскольку представляет использование перестраиваемого излучения формируемого в микроструктурированных волокнах для целей нелинейно-оптической спектроскопии и микроскопии, в частности на основе когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). В заключительных параграфах диссертационной работы продемонстрирована волоконно-оптическая методика для генерации управляемых квантовых состояний света на основе процесса спонтанного четырехволнового взаимодействия (СЧВВ) в специальных типах двулучепреломляющих фотонно-кристаллических волокон.

В параграфах 5.1 и 5.2 продемонстрированы волноводное увеличение эффективности нелинейно-оптических взаимодействий и возможности управления свойствами волноводных мод за счет масштабного изменения структуры полых фотонно-кристаллических волокон. Это открывает перспективы значительного повышения чувствительности нелинейно-оптической спектроскопии газовых сред (в том числе КАРС-спектроскопии) и позволяет снизить требования к энергиям лазерных импульсов. Экспериментальная установка основана на наносекундной Nd:YAG системе, включающей блок удвоения частоты и лазеры на органических красителях. Работы проводились с полыми волокнами с сильно различными структурами двумерно-периодической оболочки и значительно отличались диаметром сердцевины – порядка 15 и 50 мкм. В первом случае было продемонстрировано возрастание эффективности КАРС спектроскопии, более чем на порядок относительно режима жесткой фокусировки. Вторая серия экспериментов

проводилась с волокнами с диаметром сердцевины 50 мкм (что значительно превышает типичные величины для ФК световодов) и был продемонстрирован потенциал волноводной КАРС-спектроскопии для сенсорики комбинационно активных частиц, осажденных на внутренних стенках световода.

При распространении излучения в сердцевине полого ФК волокна часть его проникает в оболочку в виде эванесцентных волн, что определяет возможность вклада оболочки в нелинейно-оптическое взаимодействие. Предложенная в наших работах методика позволяет оценить влияние и вклад оболочки в общую нелинейность мод волокна, которая определяет форму КАРС-сигнала (рис.8), являющейся результатом интерференции резонансной оптической нелинейности исследуемого газа и нерезонансной составляющей материала оболочки. Спектральная форма резонансного комбинационного сигнала КАРС может значительно искажаться (особенно вблизи границ зон пропускания волокна), и учет нерезонансного вклада оболочки, позволяет повысить спектральную точность проводимых измерений.

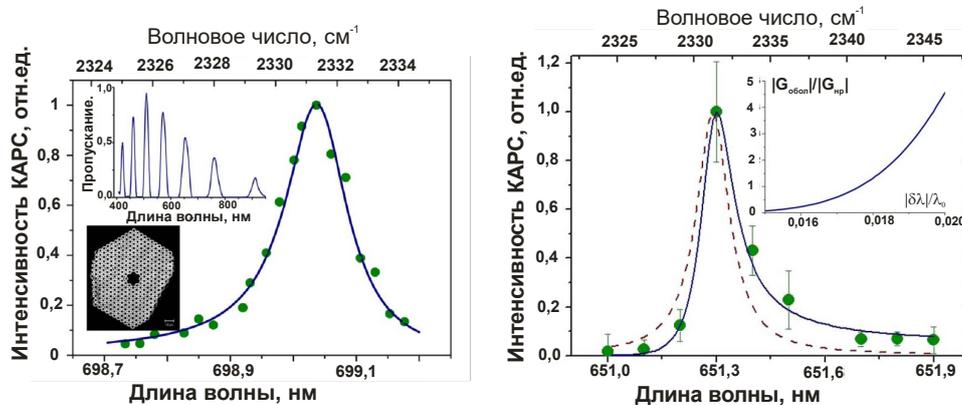


Рис. 8. (а) Опорный КАРС спектр азота, измеренный при атмосферном давлении без волокна (также пунктир на панели (б)). На вставках изображены спектр пропускания использованного волокна и изображение его поперечного среза. (б) КАРС спектр, измеренный на выходе из полого ФК волокна длиной 5 см (точки) и его аппроксимация (сплошная линия). На вставке представлено отношение  $G_{\text{НР}}$  и  $G_{\text{обол}}$ , рассчитанное как функция смещения  $|\delta\lambda|/\lambda_0$  где  $\delta\lambda = \lambda_a - \lambda_0$ . (б)

В параграфе 5.3 представлены результаты КАРС-микроспектроскопии кристаллических кремниевых структур с использованием перестраиваемого источника на основе микроструктурированных световодов с увеличенной площадью моды. В параграфе 3.5 была показана возможность получения перестраиваемых фемтосекундных импульсов в микроструктурированных волокнах с увеличенной сердцевиной ( $d = 20$  мкм и  $L = 14$  мкм) в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне при накачке излучением фемтосекундной системы на кристалле хром-форстерита в процессе солитонного самосдвига частоты. Это излучение использовалось в качестве стоксовой волны для возбуждения комбинационного резонанса продольной фононной моды кристаллического кремния с частотой  $\Omega_R = 520 \text{ см}^{-1}$ . Возможность использования импульсов в инфракрасной области спектра может являться очень важным фактором для спектроскопических приложений, особенно в случае, если исследуемое вещество непрозрачно для других диапазонов. При фокусировке излучений накачки на образец кристаллического кремния и его трехмерного сканирования

мы продемонстрировали применение КАРС микроспектроскопии для получения изображения объектов и дефектов микронного масштаба в кремниевых подложках.

В параграфах 5.4 и 5.5 представлена реализация удобной платформы на основе спектрально-временных преобразований неусиленных импульсов от хром-фостеритового генератора с удлинённым резонатором (энергия до 25 нДж при частоте повторения порядка 20 МГц) в микроструктурированных световодах и нелинейных кристаллах для задач КАРС-микроскопии. КАРС-микроспектроскопия обладает химической селективностью, что требует спектрального разрешения и предполагает использование достаточно узких спектральных линий зондирующих импульсов. В настоящем параграфе мы демонстрируем возможность увеличения селективности и спектрального разрешения КАРС-спектроскопии, основанную на методах спектральной компрессии сверхкоротких импульсов в процессах нелинейно-оптических преобразований в МС-световодах и нелинейно-оптических кристаллах. Было продемонстрировано спектральное сжатие в МС-световоде фемтосекундных импульсов от хром-форстеритового генератора с длиной волны 1.25 мкм от  $230 \text{ см}^{-1}$  до  $65 \text{ см}^{-1}$  (рис. 9), такой метод обеспечивает значительно меньшие потери излучения относительно линейной фильтрации.

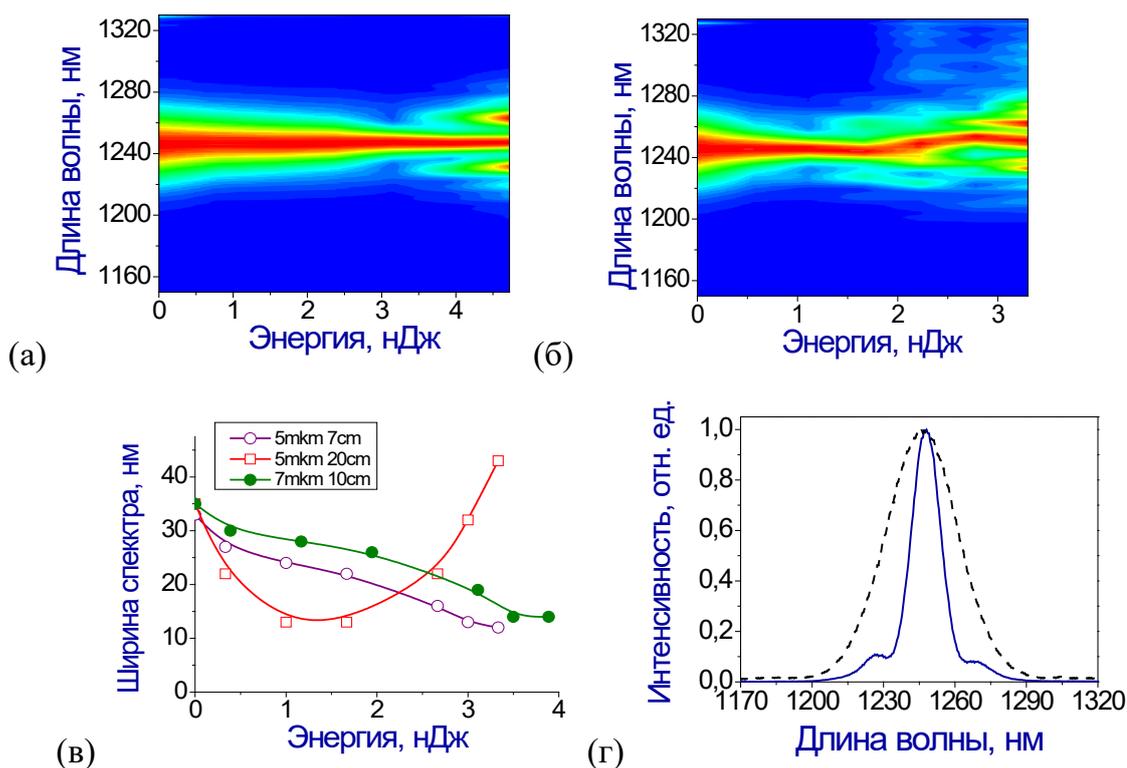


Рис.9. Динамика спектральной компрессии импульса в зависимости от его энергии в МС световоде с диаметром сердцевины 5 мкм длиной 7 см (а) и 20 см (б). (в) Изменение ширины спектра импульса в световодах различной протяженности. (г) Сжатие спектра в 3.5 раза в световоде с диаметром 5 мкм при энергии 3.2 нДж, исходный спектр, пунктирная линия, сжатый – сплошная линия.

Использование нелинейно-оптических кристаллов позволило расширить область используемых длин волн в видимый диапазон спектра. Для формирования зондирующих

импульсов, участвующих в процессе генерации нелинейного когерентного сигнала на антистоксовой частоте, был предложен метод удвоения оптической частоты лазерных импульсов в кристаллах ниобата лития с периодической доменной структурой и протяженных кристаллах трибората лития, совместно с уже рассмотренным методом спектральной компрессии импульсов в МС-световоде. В качестве демонстрации эффективности и многофункциональности развитой платформы показано, что техника фемтосекундной КАРС-спектроскопии позволяет измерять амплитуду, время дефазировки и параметры оптической нелинейности оптических фононов в синтетических алмазных пленках, а также реализовать измерение в режиме сканирующей трехмерной визуализации с микронным пространственным разрешением.

В параграфах 5.6 и 5.7 продемонстрированы различные аспекты реализации нелинейно-оптических методик исследования биологических объектов. С помощью развитой платформы КАРС-микроскопии с использованием фемтосекундной лазерной системы на базе МС-световодов и нелинейно-оптических кристаллов получены химически селективные изображения тканей областей мозга лабораторной мыши с высоким пространственным разрешением и распределения в них липидов.

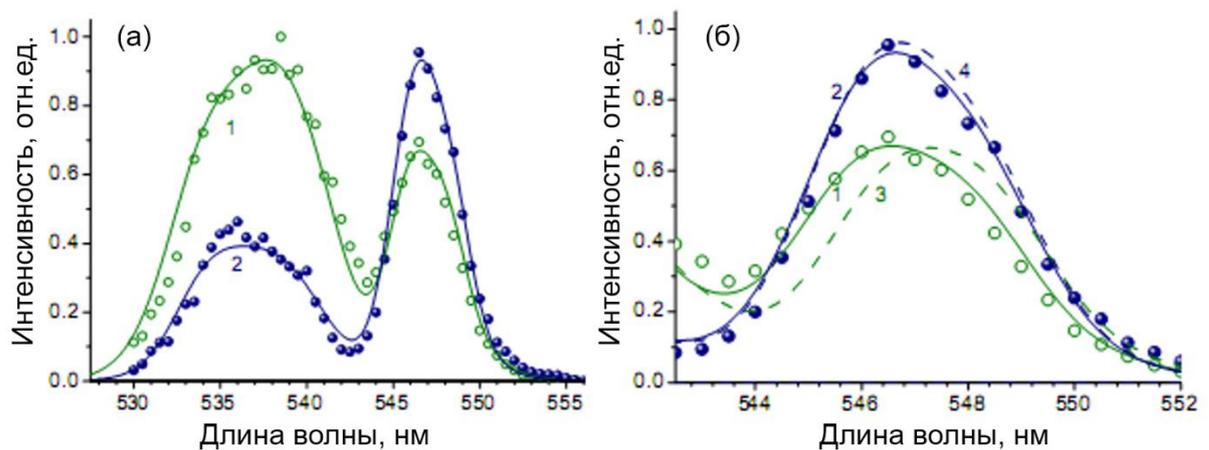


Рис.10. (а) Характерные экспериментальные КАРС спектры из двух различных областей мозга мыши с высоким (пустые кружки) и низким (закрашенные кружки) содержанием воды в сравнении с результатами численного моделирования (решение уравнения (1) с параметрами  $\epsilon = 1$  (1) и 0.45 (2)). Интенсивность импульсов накачки и стоксовых импульсов  $I_p = 3 \text{ TW/cm}^2$  и  $I_s = 0.3 \text{ TW/cm}^2$  (сплошная линия 1), при  $I_p = 0.8 \text{ TW/cm}^2$  и  $I_s = 0.08 \text{ TW/cm}^2$  (сплошная линия 2). (б) Увеличенное изображение спектров КАРС, показанных на рисунке (а), в сравнении с расчетными пунктирными кривыми 3 и 4, относящимися к режиму низкой интенсивности с  $I_p = 0.1 \text{ TW/cm}^2$  и  $I_s = 0.01 \text{ TW/cm}^2$ .

При нелинейно-оптической визуализации биологических тканей требуются достаточной высокие интенсивности лазерного излучения для обеспечения чувствительности, высокого соотношения сигнал/шум и скорости получения изображения. Высокоинтенсивные лазерные импульсы могут привести к ионизации вещества и соответственно росту плотности электронов при отсутствии видимых повреждений биологических тканей. Наши эксперименты показывают, что сверхбыструю ионизацию можно зарегистрировать за счет коротковолнового смещения частоты антистоксова сигнала

(рис.10). Анализ частотного сдвига спектра КАРС в зависимости от лазерной интенсивности позволяет количественно характеризовать эффекты ионизации, которые неизбежно выступают в качестве ограничивающего фактора повышения интенсивности зондирующих импульсов.

Интересным и эффективным продолжением применения нелинейно-оптических спектральных преобразований фемтосекундных импульсов в высоконелинейных микроструктурированных волноводах является их использование в задачах многофотонной спектроскопии различных белковых флуоресцентных меток и сенсоров, что было кратко продемонстрировано в заключении этого раздела.

В параграфах 5.8 и 5.9 представлена реализация источника коррелированных фотонных пар и одиночных провозглашенных фотонов на основе векторного четырехволнового взаимодействия в фотонно-кристаллическом световоде. Наиболее распространенным методом получения фотонных пар является спонтанное параметрическое рассеяния (СПР) в нелинейных кристаллах с квадратичной нелинейностью. В качестве альтернативы СПР можно рассматривать процесс спонтанного четырехволнового взаимодействия (ЧВВ) в оптических волноводах. Для проведения экспериментов была создана установка, позволяющая получать и анализировать свойства спектрально-запутанных фотонных пар в процессах векторного ЧВВ в высоконелинейном двулучепреломляющем ФК волокне модели NL-PM-750 от излучения фемтосекундного Ti:Sapphire генератора. Особое внимание уделялось исследованию генерации фотонных пар на частотах сигнальной и холостой волн в различных поляризационных модах при ортогонально-поляризованной накачке (ЧВВ II типа), что позволяет повысить контраст генерируемых фотонных пар относительно рамановского шума (рис.11). В экспериментах была зарегистрирована скорость счета фотонных пар  $2 \times 10^5$  Гц при средней мощности накачки 2.5 мВт. Это соответствует яркости источника  $8 \times 10^4$  Гц/мВт, что более чем на два порядка превышает результаты, обычно получаемые в процессе СПР в нелинейных кристаллах.

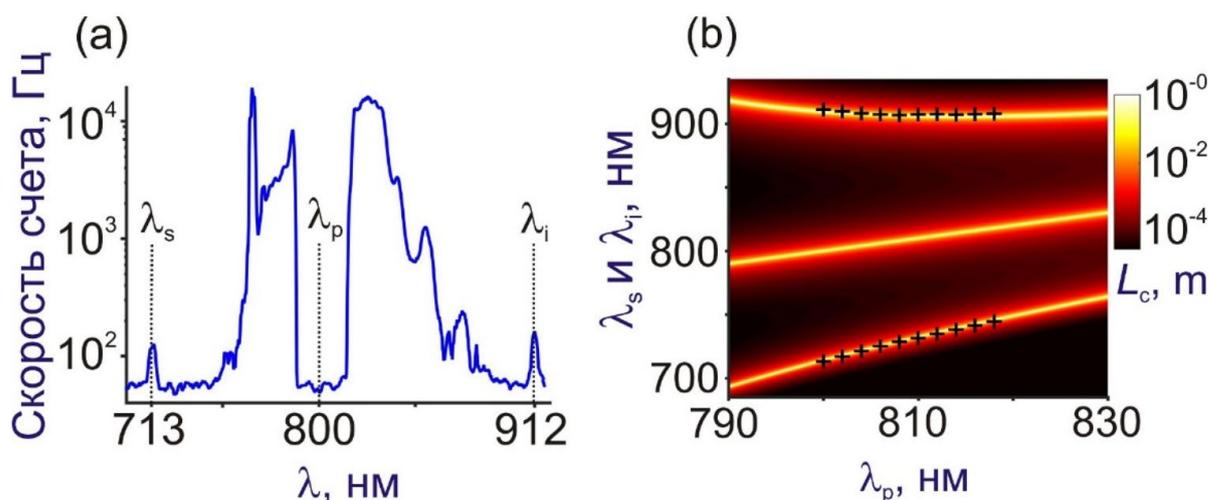


Рис. 11. (а) Спектр излучения на выходе из фотонно-кристаллического волокна при накачке на  $\lambda_p=800$  нм. (б) Спектральная карта векторного ЧВВ II типа (цвет) и результаты измерения сигнальных и холостых дин волн (крестики).

С учетом эффективности детекторов скорость генерации фотонов в спонтанном ЧВВ II-типа превышает  $10^6$  Гц, и лимитирующими факторами являются параметры детектирующей системы. Адаптация системы измерений к анализу одиночных провозглашенных фотонов позволила исследовать их корреляционные характеристики в широком диапазоне параметров импульсов накачки.

Другим важным вопросом, характеризующим генерируемые фотонные пары, является квантовая запутанность. Проведенный анализ показывает, что состоянием фотонных пар, генерируемых в процессе векторного ЧВВ, можно управлять, изменяя длину волны накачки и геометрию поляризации, создавая при этом как высокочистые низкоразмерные запутанные состояния, так и высокоэнтропийные запутанные состояния в пространстве высокой размерности. Особенности дисперсионных свойств фотонно-кристаллического волокна NL-PM-750, в частности, наличие двух областей с нулевой дисперсией групповых скоростей, позволили экспериментально реализовать генерация сверхширокополосных бифотонов (180 ТГц). Также использование высоконелинейного фотонно-кристаллического волокна NL-PM-750 обеспечило генерацию фотонных пар в видимом и телекоммуникационном диапазонах на длинах волн вблизи 0.5 и 1.6 мкм при непрерывной накачке, что представляет высокий интерес для создания интегральных источников коррелированных фотонных пар.

В заключительном *параграфе 5.9* диссертации продемонстрирована экспериментальная реализация метода линейной квантовой спектроскопии с использованием частотно-коррелированных фотонных пар, формируемых в невырожденном процессе четырехволнового смешения в двулучепреломляющем ФК волокне NL-PM-750. Измерены спектры пропускания раствора органического красителя на основе тетра-третбутил-фталоцианина в диапазоне 690-740 нм при непосредственном сканировании в сопряженном канале на длинах волн 905-920 нм. Метод обладает высокой устойчивостью к фоновому излучению и может быть реализован с низкими потоками фотонов, что исключает фотоповреждение светочувствительных образцов, например, биологических объектов.

## **Заключение.**

Исследования, представленные в диссертационной работе, позволили достичь прогресса в понимании физических механизмов нелинейно-оптического преобразования при распространении лазерных импульсов в микроструктурированных волноводах. Можно обобщить и выделить несколько наиболее существенных результатов диссертационной работы, имеющих существенное значение для практических применений в области физики сверхкоротких импульсов, нелинейной спектроскопии и квантовой оптики.

- Использование генерируемых в хром-форстеритовом лазере с удлиненным резонатором (частота повторения порядка 20 МГц, центральная длина 1.25 мкм) наноджоулевых фемтосекундных импульсов для накачки микроструктурированных кварцевых световодов со сплошной твердотельной сердцевиной диаметром порядка 5 мкм обеспечивает их

эффективное спектральное преобразование в режиме солитонного самосдвига частоты (ССЧ). Получена широкополосная перестройка солитонных импульсов с энергией до 3 нДж в диапазоне от 1300 до 1800 нм. Их длительность имеет характерные значения 60-70 фс, что соответствует пиковым мощностям до 100 кВт. Характеристики этих импульсов позволяют осуществлять их дальнейшее спектрально-временное преобразование в процессе генерации второй оптической гармоники в нелинейно-оптических кристаллах, что обеспечивает возможность расширения области перестройки (включая основное излучение хром-форстеритового генератора) до диапазона 630-1800 нм. Наличие таких источников важно для реализации мультимодальной платформы нелинейной визуализации, включая КАРС–микроспектроскопию.

- Волноводный режим нелинейно-оптического взаимодействия, реализуемый в изолированных модах полых ФК-волноводов, приводит к радикальному увеличению эффективности четырехволновых взаимодействий по сравнению с режимом жесткой фокусировки, что обеспечивает возможность использования полых ФК-волноводов в качестве инструментов для газового анализа, на основе когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). Интерферометрическая природа сигнала КАРС позволяет проанализировать вклад оболочки в общую нелинейность волноводных мод полых микроструктурированных волокон, что повышает чувствительность и точность спектральных измерений.

- Дисперсионные и нелинейные свойства полых антирезонансных световодов револьверного типа с диаметром сердцевинки 70 мкм, толщиной стенок внутренних капилляров оболочки порядка 500 нм, заполненных инертным газом при высоком давлении, обеспечивают эффективное нелинейно-оптическое преобразование фемтосекундных импульсов накачки ближнего и среднего инфракрасного диапазона с субмиллиджоулевыми уровнями энергий в режиме солитонной самокомпрессии. Подбор давления газа и энергии фемтосекундных импульсов накачки создает условия формирования мультиоктавного суперконтинуума и высокоэнергетичных предельно коротких импульсов с длительностями порядка цикла поля (на длине волны в области 2 мкм) и пиковыми мощностями более 2 ГВт. Такие импульсы находят применение в области аттосекундной оптики и петагерцовой оптоэлектроники.

- Продемонстрирована возможность использования спонтанного четырехволнового взаимодействия в высоконелинейных двулучепреломляющих фотонно-кристаллических волокнах для эффективной управляемой генерации коррелированных фотонных пар и одиночных фотонов. Впервые подробно рассмотрена генерация фотонных пар при пяти возможных поляризационных конфигурациях четырехволнового взаимодействия (ЧВВ) с одноцветной накачкой, с использованием которых можно создать спектрально запутанные и факторизуемые фотонные пары. Экспериментально получены и охарактеризованы кросс-поляризованные фотонные пары, созданные в процессе векторного ЧВВ II типа в ФК волокне модели NL-PM-750. Яркость источника составляет  $8 \times 10^4$  Гц/мВт при средней

мощности накачки 2.5 мВт и  $g^{(2)}(0) = 10$ . Полученная яркость значительно превосходит аналогичные параметры СПР-источников фотонных пар ( $\sim 1000$  Гц/мВт). Векторное четырехволновое взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов в двулучепреломляющем, высоконелинейном оптическом волокне может быть источником широкополосного многомерного перепутывания в непрерывных переменных с тонко настраиваемой энтропией и чистотой состояний. Состоянием фотонных пар такого векторного ЧВВ можно управлять, изменяя длину волны накачки и геометрию поляризации, создавая при этом как высокочистые низкоразмерные запутанные состояния, так и высокоэнтропийные запутанные состояния в пространстве высокой размерности. Дана количественная характеристика степени спектральной запутанности фотонной пары, как функции дисперсионных свойств ФК волокна и параметров оптического поля накачки, в частности, центральной длины волны накачки, ее поляризации и мощности. Впервые экспериментально реализован метод линейной квантовой (фантомной) спектроскопии с использованием частотно-коррелированных фотонных пар, полученных в волоконном источнике на основе векторного спонтанного ЧВВ в фотонно-кристаллическом волокне. Получен спектр пропускания тестового красителя в диапазоне 905 – 935 нм при непосредственном сканировании в сопряженном канале на длинах волн 700 – 740 нм. Сравнение измеренного спектра с полученным при использовании классического источника света является критерием достоверности результата.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus и RSCI.*

1. Fedotov A.V. Tuning the photonic band gap of sub-500-nm-pitch holey fibers in the 930–1030-nm range / Ivanov A.A., Alfimov M.V., Beloglazov V.I., Mel'nikov L.A., Skibina Yu.S., Zheltikov A.M. // *Laser Physics*. – 2000. – Т. 10. – №. 5. – С. 1086–1088. JIF WoS: 0.750 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 70%.
2. Алфимов М.В. Фотонно-кристаллические волноводы с фотонной запрещенной зоной, перестраиваемой в области 930-1030 нм / Желтиков А.М., Иванов А.А., Белоглазов В.И., Кириллов Б.А., Магницкий С.А., Тарасишин А.В., Федотов А.Б., Мельников Л.А., Скибина Н.Б. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2000. – Т. 71. – №. 12. – 714–719. ИФ РИНЦ: 0.818 / 0,69 п.л. / вклад соискателя 40%.
3. Желтиков А.М. Управляемая локализация света и нелинейно-оптические взаимодействия сверхкоротких лазерных импульсов в микро- и наноструктурированных волокнах с перестраиваемой фотонной запрещенной зоной / Алфимов М.В., Федотов А.Б., Иванов А.А., Сырчин М.С., Тарасевич А.П., Фон дер Линде Д. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2001. – Т. 120(3). – №. 9. – С. 570–582. ИФ РИНЦ: 0.916 / 1,50 п.л. / вклад соискателя 40%.
4. Fedotov A.V. Holey fibers with 0.4–32-m-lattice-constant photonic band-gap cladding: Fabrication, characterization, and nonlinear-optical measurements / Alfimov M.V. Ivanov A.A., Tarasishin A.V., Beloglazov V.I., Tarasevitch A.P., Von der Linde D., Kirillov B.A., Magnitskii S.A. Chorvat D., Chorvat D. Jr., Naumov A.N., Vlasova E.A., Sidorov-Biryukov D.A., Podshivalov A.A., Kolevatova O.A., Melnikov L.A., Akimov D.A., Makarov V.A., Skibina Yu.S., Zheltikov A.M. // *Laser Physics*. – 2001. – Т. 11. – №. 1. – С. 138–145. JIF WoS: 0.791 / 0,92 п.л. / вклад соискателя 60%.

5. Федотов А.Б. Уширение спектра фемтосекундных лазерных импульсов в волноводах с фотонно-кристаллической оболочкой / Желтиков А.М., Мельников Л.А., Тарасевич А.П., Фон дер Линде Д. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2000. – Т. 71. – № 7. – С. 407–411. ИФ РИНЦ: 0.818 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 60%.
6. Fedotov A.B. Enhanced spectral broadening of short laser pulses in high-numerical-aperture holey fibers / Zheltikov A.M., Tarasevitch A.P., Von der Linde D. // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2001. – Т. 73. – № 2. – С. 181–184. JIF WoS: 2.277 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 60%.
7. Федотов А.Б. Модовая структура и спектральные свойства излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированных волокнах / Пинг Жу, Кондратьев Ю.Н., Багаев С.Н., Шевандин В.С., Дукельский К.В., Смирнов В.Б., Тарасевич А.П., Фон дер Линде Д., Желтиков А.М. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2002. – Т. 95. – № 5. – С. 851–860. ИФ РИНЦ: 0.916 / 1,16 п.л. / вклад соискателя 60%.
8. Fedotov A.B. Microstructure-fiber sources of mode-separable supercontinuum emission for wave-mixing spectroscopy / Ping Zh., Tarasevitch A.P., Dukelskii K.V., Kondrat'ev Yu.N., Shevandin V.S., Smirnov V.B., Von der Linde D., Zheltikov A.M. // Journal of Raman Spectroscopy. – 2002. – Т. 33. – № 11-12. – С. 888–895. JIF WoS: 0.852 / 0,92 п.л. / вклад соискателя 60%.
9. Fedotov A.B. Assorted non-linear optics in microchannel waveguides of photonic-crystal fibers / Konorov S.O., Serebryannikov E.E., Sidorov-Biryukov D.A., Mitrokhin V.P., Dukelskii K.V., Khokhlov A.V., Shevandin V.S., Kondratev Yu.N., Scalora M., Zheltikov A.M. // Optics Communications. – 2005. – Т. 255. – № 4-6. – С. 218–224. JIF WoS: 1.872 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 30%.
10. Fedotov A.B. Supercontinuum generation in photonic-molecule modes of microstructure fibers / Naumov A.N., Bugar I., Chorvat D., Sidorov-Biryukov D.A., Chorvat D. Jr., Zheltikov A.M. // IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics. – 2002. – Т. 8. – № 3. – С. 665–667. JIF WoS: 3.378 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 40%.
11. Fedotov A.B. Frequency-tunable supercontinuum generation in photonic-crystal fibers by femtosecond pulses of an optical parametric amplifier / Naumov A.N., Zheltikov A.M., Bugar I., Chorvat D., Chorvat D. Jr., Tarasevitch A.P., Von der Linde D. // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics. – 2002. – Т. 19. – № 9. – С. 2156–2164. JIF WoS: 2.147 / 1,04 п.л. / вклад соискателя 50%.
12. Fedotov A.B. Photonic-molecule modes of a microstructure cobweb fiber / Naumov A.N., Konorov S.O., Beloglazov V.I., Melnikov L.A., Skibina N.B., Sidorov-Biryukov D.A., Shcherbakov A.V., Zheltikov A.M. // Laser Physics. – 2002. – Т. 12. – № 11. – С. 1363–1365. JIF WoS: 0.857 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 50%.
13. Федотов А.Б. Локализация света и переключаемая генерация суперконтинуума в модах циклической фотонной молекулы микроструктурированного волокна / Бугар И., Наумов А.Н., Хорват Д. мл., Сидоров-Бирюков Д.А., Хорват Д., Желтиков А.М. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2002. – Т. 75. – № 7. – С. 374–378. ИФ РИНЦ: 0.818 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 50%.
14. Konorov S.O. Anti-stokes generation in guided modes of photonic-crystal fibers modified with an array of nanoholes / Akimov D.A., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Fedotov A.B., Sidorov-Biryukov D.A., Melnikov L.A., Shcherbakov A.V., Bugar I., Chorvat D. Jr., Uherek F., Chorvat D., Zheltikov A.M. // Laser Physics Letters. – 2004. – Т. 1. – № 8. – С. 402–405. JIF WoS: 1.226 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 40%.
15. Konorov S.O. Chirp-controlled anti-stokes frequency conversion of femtosecond pulses in photonic-crystal fibers / Bugar I., Sidorov-Biryukov D.A., Chorvat D. Jr., Kondratev Yu.N., Shevandin V.S., Dukelskii K.V., Khokhlov A.V., Fedotov A.B., Uherek F., Morozov V.B.,

- Makarov V.A., Chorvat D., Zheltikov A.M. // *Laser Physics*. – 2004. – Т. 14. – № 5. – С. 772–775. JIF WoS: 0.857 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 40%.
16. Акимов Д.А. Спектральное сверхширение субнаноджоулевых фемтосекундных импульсов лазера на хром-форстерите в перетяннутом волокне / Алфимов М.В., Багаев С.Н., Биркс Т., Иванов А.А., Федотов А.Б., Уодсуорт У. Дж., Рассел Ф.С. Дж., Пивцов В.С., Подшивалов А.А., Желтиков А.М. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2001. – Т. 74. – № 9. – С. 515–519. ИФ РИНЦ: 0.818 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 40%.
  17. Akimov D.A. Two-octave spectral broadening of subnanojoule cr:forsterite femtosecond laser pulses in tapered fibers / Ivanov A.A., Alfimov M.V., Bagayev S.N., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.J., Fedotov A.B., Pivtsov V.S., Podshivalov A.A., Zheltikov A.M. // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2002. – Т. 74. – № 4-5. – С. 307–311. JIF WoS: 2.203 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 30%.
  18. Федотов А.Б. Волноводные свойства и спектр собственных мод полых фотонно-кристаллических волокон / Коноров С.О., Колеватова О.А., Белоглазов В.И., Скибина Н.Б., Мельников Л.А., Щербаков А.В., Желтиков А.М. // *Квантовая электроника*. – 2003. – Т. 33. – № 3. – С. 271–274. ИФ РИНЦ: 0.902 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 30%.
  19. Коноров С.О. Собственные моды полых фотонно-кристаллических волокон / Федотов А.Б., Колеватова О.А., Белоглазов В.И., Скибина Н.Б., Щербаков А.В., Желтиков А.М. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2002. – Т. 76. – № 6. – С. 401–405. ИФ РИНЦ: 0.818 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 30%.
  20. Коноров С.О. Эволюция огибающей и фазы фемтосекундных импульсов в полых фотонно-кристаллических волокнах / Федотов А.Б., Белоглазов В.И., Скибина Н.Б., Щербаков А.В., Желтиков А.М. // *Квантовая электроника*. – 2004. – Т. 34. – № 1. – С. 51–55. ИФ РИНЦ: 0.902 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 20%.
  21. Chia S.H. A sub-100fs self-starting cr:forsterite laser generating 1.4w output power / Liu T.M., Ivanov A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Tsai M.R., Chan M.C., Yu C.H., Sun C.K. // *Optics Express*. – 2010. – Т. 18. – № 23. – С. 24085–24091. JIF WoS: 4.692 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 20%.
  22. Ivanov A.A. High-energy self-mode-locked cr:forsterite laser near the soliton blowup threshold / Martynov G.N., Lanin A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2020. – Т. 45. – № 7. – С. 1890–1893. JIF WoS: 4.180 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 50%.
  23. Ivanov A.A. Pulse-width-tunable 0.7 W mode-locked cr:forsterite laser / Voronin A.A., Lanin A.A., Sidorov-Biryukov D.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2014. – Т. 39. – № 2. – С. 205–208. JIF WoS: 4.282 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 40%.
  24. Lanin A.A. Ultrabroadband xfrog of few-cycle mid-infrared pulses by four-wave mixing in a gas / Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2014. – Т. 31. – № 8. – С. 1901–1905. JIF WoS: 2.319 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 40%.
  25. Fedotov A.B. Dispersion and nonlinearity nanomanagement of highly nonlinear photonic-crystal fibers for the spectral transformation of cr:forsterite laser pulses / Serebryannikov E.E., Ivanov A.A., Melnikov L.A., Shcherbakov A.V., Sidorov-Biryukov D.A., Sun Ch.-K., Alfimov M.V., Zheltikov A.M. // *Laser Physics Letters*. – 2006. – Т. 3. – № 6. – С. 301–305. JIF WoS: 1.341 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 60%.
  26. Fedotov A.B. Highly nonlinear photonic-crystal fibers for the spectral transformation of cr:forsterite laser pulses / Serebryannikov E.E., Ivanov A.A., Sidorov-Biryukov D.A., Melnikov L.A., Shcherbakov A.V., Sun Ch.-K., Alfimov M.V., Zheltikov A.M. // *Optics Communications*. – 2006. – Т. 267. – № 2. – С. 505–510. JIF WoS: 1.682 / 0,69 п.л. / вклад соискателя 40%.

27. Fedotov A.B. Powerful wavelength-tunable ultrashort solitons in a solid-core photonic-crystal fiber / Voronin A.A., Fedotov I.V., Ivanov A.A., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2009. – Т. 34. – № 6. – С. 851–853. JIF WoS: 4.350 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 50%.
28. Fedotov A.B. Spectral transformation of femtosecond cr:forsterite laser pulses in a flint-glass photonic-crystal fiber / Serebryannikov E.E., Ivanov A.A., Zheltikov A.M. // *Applied optics*. – 2006. – Т. 45. – № 26. – С. 6823–6830. JIF WoS: 2.117 / 0,92 п.л. / вклад соискателя 60%.
29. Fedotov A.B. Soft-glass photonic-crystal fibers for frequency shifting and white-light spectral superbroadening of femtosecond cr:forsterite laser pulses / Sidorov-Biryukov D.A., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Sun C.-K., Zheltikov A.M. // *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*. – 2006. – Т. 23. – № 7. – С. 1471–1477. JIF WoS: 2.486 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 60%.
30. Ivanov A.A. Wavelength-tunable parametric third-harmonic generation in a photonic-crystal fiber / Sidorov-Biryukov D.A., Fedotov A.B., Serebryannikov E.E., Zheltikov A.M. // *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*. – 2007. – Т. 24. – № 3. – С. 571–575. JIF WoS: 2.594 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 60%.
31. Fedotov A.B. Multifrequency third-harmonic generation by red-shifting solitons in a multimode photonic-crystal fiber / Voronin A.A., Serebryannikov E.E., Fedotov I.V., Mitrofanov A.V., Ivanov A.A., Sidorov-Biryukov D.A., Zheltikov A.M. // *Physical Review E – Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. – 2007. – Т. 75. – № 1. – С. 016614–016620. JIF WoS: 2.623 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 60%.
32. Коноров С.О. Изменение спектров пропускания и оптических потерь полых фотонно-кристаллических волноводов при заполнении их жидкостью / Серебрянников Е.Е., Желтикова Д.А., Митрохин В.П., Сидоров-Бирюков Д.А., Федотов А.Б., Килин С.Я., Желтиков А.М. // *Квантовая электроника*. – 2005. – Т. 35. – № 9. – С. 839–843. ИФ РИНЦ: 0.902 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 20%.
33. Serebryannikov E.E. Third-harmonic generation by raman-shifted solitons in a photonic-crystal fiber / Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Skryabin D.V., Yulin A.V., Knight J.C. // *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*. – 2006. – Т. 23. – № 9. – С. 1975–1980. JIF WoS: 2.486 / 0,69 п.л. / вклад соискателя 60%.
34. Fedotov A.B. Generation of a cross-phase-modulated third harmonic with unamplified femtosecond cr:forsterite laser pulses in a holey fiber / Yakovlev V.V., Zheltikov A.M. // *Laser Physics*. – 2002. – Т. 12. – № 2. – С. 268–272. JIF WoS: 0.857 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 70%.
35. Федотов А.Б. Преобразование частоты сверхкоротких лазерных импульсов в наноструктурированных световодах / Серебрянников Е.Е., Иванов А.А., Сидоров-Бирюков Д.А., Щербаков А.В., Мельников Л.А., Алфимов М.В., Желтиков А.М. // *Российские нанотехнологии*. – 2006. – Т. 1. – С. 240–243. ИФ РИНЦ: 0.886 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 40%.
36. Fedotov A.B. Spectral compression of frequency-shifting solitons in a photonic-crystal fiber / Voronin A.A., Fedotov I.V., Ivanov A.A., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2009. – Т. 34. – № 5. – С. 662–664. JIF WoS: 4.350 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 40%.
37. Voronin A.A. Spectral interference of frequency-shifted solitons in a photonic-crystal fiber / Fedotov I.V., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2009. – Т. 34. – № 5. – С. 569–571. JIF WoS: 4.350 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 40%.
38. Fedotov I.V. Generation of 20 fs, 20 mw pulses in the near-infrared by pulse compression using a large-mode-area all-silica photonic band-gap fiber / Lanin A.A., Voronin A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Egorova O.N., Semjonov S.L., Pryamikov A.D., Dianov E.M. // *Journal of Modern Optics*. – 2010. – Т. 57. – № 19. – С. 1867–1870. JIF WoS: 1.042 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 40%.

39. Fedotov I.V. Multisoliton supercontinuum from a photonic-crystal fibre as a source of frequency-tunable megawatt femtosecond pulses in the infrared / Voronin A.A., Fedotov A.B., Shevandin V.S., Dukelskii K.V., Zheltikov A.M. // *Quantum Electronics*. – 2009. – Т. 39. – № 7. – С. 634–637. JIF WoS: 0.882 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 40%.
40. Mitrokhin V.P. Spectral transformation of megawatt femtosecond optical pulses in large-mode-area high-index-step photonic-crystal fibers / Ivanov A.A., Fedotov A.B., Alfimov M.V., Dukelskii K.V., Khokhlov A.V., Shevandin V.S., Kondratev Yu.N., Podshivalov A.A., Zheltikov A.M. // *Laser Physics Letters*. – 2007. – Т. 4. – № 7. – С. 529–533. JIF WoS: 1.647 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 40%.
41. Kondratev Yu.N. Microstructured lightguides with a quartz core for obtaining a spectral supercontinuum in the femtosecond range / Khokhlov A.V., Shevandin V.S., Zheltikov A.M., Konorov S.O., Serebryannikov E.E., Sidorov-Biryukov D.A., Fedotov A.B., Semenov S.L. // *Journal of Optical Technology*. – 2005. – Т. 72. – № 7. – С. 548–550. JIF WoS: 0.192 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 40%.
42. Fedotov A.B. Ionization-induced blueshift of high-peak-power guided-wave ultrashort laser pulses in hollow-core photonic-crystal fibers / Serebryannikov E.E., Zheltikov A.M. // *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*. – 2007. – Т. 76. – № 5. – 053811. JIF WoS: 3.093 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 50%.
43. Konorov S.O. Transmission of ultrashort pulses through hollow photonic-crystal fibers with passbands in the visible and infrared spectral ranges / Fedotov A.B., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Scalora M., Vaselli M., Zheltikov A.M. // *Laser Physics*. – 2004. – Т. 14. – № 5. – С. 780–784. JIF WoS: 0.857 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 30%.
44. Konorov S.O. Laser breakdown with millijoule trains of picosecond pulses transmitted through a hollow-core photonic-crystal fiber / Fedotov A.B., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Shcherbakov A.V., Wintner E., Zheltikov A.M. // *Laser Physics*. – 2003. – Т. 13. – № 4. – С. 652–656. JIF WoS: 0.791 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 50%.
45. Konorov S.O. Guiding femtosecond second-harmonic pulses of a cr: Forsterite laser through hollow-core photonic-crystal fibers / Fedotov A.B., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Podshivalov A.A., Petrov A.N., Shcherbakov A.V., Zheltikov A.M. // *Laser Physics*. – 2003. – Т. 13. – № 7. – С. 1046–1049. JIF WoS: 0.791 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 20%.
46. Konorov S.O. Laser breakdown with millijoule trains of picosecond pulses transmitted through a hollow-core photonic-crystal fibre / Fedotov A.B., Kolevatova O.A., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Shcherbakov A.V., Wintner E., Zheltikov A.M. // *Journal of Physics D - Applied Physics*. – 2003. – Т. 36. – № 12. – С. 1375–1381. JIF WoS: 1.397 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 40%.
47. Konorov S.O. Waveguide modes and dispersion properties of hollow-core photonic-crystal and aperiodic-cladding fibers / Fedotov A.B., Kolevatova O.A., Serebryannikov E.E., Sidorov-Biryukov D.A., Mikhailova J.M., Naumov A.N., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Melnikov L.A., Shcherbakov A.V., Zheltikov A.M. // *Laser Physics*. – 2003. – Т. 13. – № 2. – С. 148–160. JIF WoS: 0.791 / 1,50 п.л. / вклад соискателя 30%.
48. Konorov S.O. Large-core-area hollow photonic-crystal fibers / Fedotov A.B., Melnikov L.A., Shcherbakov A.V., Zheltikov A.M. // *Laser Physics Letters*. – 2004. – Т. 1. – № 11. – С. 548–550. JIF WoS: 1.226 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 30%.
49. Konorov S.O. Laser ablation of dental tissues with picosecond pulses of 1.06- $\mu\text{m}$  radiation transmitted through a hollow-core photonic-crystal fiber / Mitrokhin V.P., Fedotov A.B., Sidorov-Biryukov D.A., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Shcherbakov A.V., Wintner E., Scalora M., Zheltikov A.M. // *Applied optics*. – 2004. – Т. 43. – № 11. – С. 2251–2256. JIF WoS: 1.925 / 0,69 п.л. / вклад соискателя 30%.
50. Konorov S.O. Hollow-core photonic-crystal fibres for laser dentistry / Mitrokhin V.P., Fedotov A.B., Sidorov-Biryukov D.A., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Wintner E., Scalora

- M., Zheltikov A.M. // *Physics in Medicine and Biology*. – 2004. – Т. 49. – № 7. – С. 1359–1368. JIF WoS: 2.627 / 1,16 п.л. / вклад соискателя 40%.
51. Федотов А.Б. Полые фотонно-кристаллические волокна для передачи мегаваттных фемтосекундных импульсов в солитонном режиме / Сидоров-Бирюков Д.А., Иванов А.А., Алфимов М.В., Желтиков А.М. // *Российские нанотехнологии*. – 2007. – Т. 2. – № 3-4. – С. 134–139. ИФ РИНЦ: 0.886 / 0,69 п.л. / вклад соискателя 40%.
  52. Lanin A.A. Air-guided photonic-crystal-fiber pulse-compression delivery of multimegawatt femtosecond laser output for nonlinear-optical imaging and neurosurgery / Fedotov I.V., Sidorov-Biryukov D.A., Doronina-Amitonova L.V., Ivashkina O.I., Zots M.A., Sun C.K., Ilday F.O., Fedotov A.B., Anokhin K.V., Zheltikov A.M. // *Applied Physics Letters*. – 2012. – Т. 100. – № 10. – 101104. JIF WoS: 4.246 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 30%.
  53. Voronin A.A. Understanding the nonlinear-optical response of a liquid-core photonic-crystal fiber / Mitrokhin V.P., Ivanov A.A., Fedotov A.B., Sidorov-Biryukov D.A., Beloglazov V.I., Alfimov M.V., Ludvigsen H., Zheltikov A.M. // *Laser Physics Letters*. – 2010. – Т. 7. – № 1. – С. 46–49. JIF WoS: 6.184 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 20%.
  54. Savitsky I.V. Single-cycle, multigigawatt carrier-envelope-phase-tailored near-to-mid-infrared driver for strong-field nonlinear optics / Stepanov E.A., Lanin A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *ACS Photonics*. – 2022. – Т. 9. – № 5. – С. 1679–1690. JIF WoS: 7.213 / 1,39 п.л. / вклад соискателя 30%.
  55. Savitsky I.V. Sub-cycle pulse revealed with carrier-envelope phase control of soliton self-compression in anti-resonant hollow-core fiber / Voronin A.A., Stepanov E.A., Lanin A.A., Fedotov A.B. // *Optics Letters*. – 2023. – Т. 48. – № 17. – С. 4468–4471. JIF WoS: 3.266 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 30%.
  56. Stepanov E.A. Multioctave supercontinua from shock-coupled soliton self-compression / Voronin A.A., Meng F., Mitrofanov A.V., Sidorov-Biryukov D.A., Rozhko M.V., Glek P.B., Li Y., Fedotov A.B., Pugžlys A., Baltuška A., Liu B., Gao S., Wang Y., Wang P., Hu M., Zheltikov A.M. // *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*. – 2019. – Т. 99. – № 3. – 033855. JIF WoS: 2.937 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 30%.
  57. Савицкий И.В. Модовый состав излучения суперконтинуума предельно коротких импульсов в полых антирезонансных волноводах / Степанов Е.А., Ланин А.А., Федотов А.Б. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2023. – Т. 117. – № 3-4. – С. 285–291. ИФ РИНЦ: 0.818 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 30%.
  58. Савицкий И.В. Влияние фазы несущей относительно огибающей на генерацию мультиоктавного суперконтинуума и предельно коротких импульсов в полых антирезонансных световодах / Воронин А.А., Степанов Е.А., Ланин А.А., Федотов А.Б. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2023. – Т. 118. – № 7. – С. 493–501. ИФ РИНЦ: 0.818 / 1,04 п.л. / вклад соискателя 30%.
  59. Савицкий И.В. Измерение временной структуры поля и фазы несущей однопериодных импульсов ближнего и среднего инфракрасного диапазона / Степанов Е.А., Ланин А.А., Воронин А.А., Серебрянников Е.Е., Иванов А.А., Ху М., Ли Я., Федотов А.Б., Желтиков А.М. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2022. – Т. 115. – № 7. – С. 437–443. ИФ РИНЦ: 0.818 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 30%.
  60. Акимов Д.А. Фемтосекундная спектроскопия когерентного антистоксова рассеяния света с использованием перестраиваемого излучения, генерируемого в микроструктурированных волокнах / Коноров С.О., Алфимов М.В., Иванов А.А., Белоглазов В.И., Скибина Н.Б., Федотов А.Б., Сидоров-Бирюков Д.А., Петров А.Н., Желтиков А.М. // *Квантовая электроника*. – 2004. – Т. 34. – № 5. – С. 473–476. ИФ РИНЦ: 0.902 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 20%.

61. Fedotov A.B. Supercontinuum-generating holey fibers as new broadband sources for spectroscopic applications / Zheltikov A.M., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Chorvat D., Chorvat D. Jr, Beloglazov V.I., Melnikov L.A., Skibina N.B., Tarasevitch A.P., and Von der Linde D. // *Laser Physics*. – 2000. – Т. 10. – № 3. – С. 723–726. JIF WoS: 0.750 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 40%.
62. Smirnov M.A. Bright ultra-broadband fiber-based biphoton source / Fedotov I.V., Smirnova A.M., Khairullin A.F., Moiseev S.A. // *Optics Letters*. – 2024. – Т. 49. – № 14. – С. 3838–3841. JIF WoS: 3.266 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 20%.
63. Konorov S.O. Hollow-core photonic-crystal fibers optimized for four-wave mixing and coherent anti-stokes raman scattering / Fedotov A.B., Sidorov-Biryukov D.A., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Shcherbakov A.V., Zheltikov A.M. // *Journal of Raman Spectroscopy*. – 2003. – Т. 34. – № 9. – С. 688–692. JIF WoS: 1.359 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 30%.
64. Mitrofanov A.V. Highly birefringent silicate glass photonic-crystal fiber with polarization-controlled frequency-shifted output: A promising fiber light source for nonlinear raman microspectroscopy / Linik Y.M., Buczynski R., Pysz D., Lorenc D., Bugar I., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Express*. – 2006. – Т. 14. – № 22. – С. 10645–10651. JIF WoS: 5.352 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 20%.
65. Fedotov A.B. Four-wave mixing of picosecond pulses in hollow fibers: expanding the possibilities of gas-phase analysis / Giammanco F., Naumov A.N., Marsili P., Ruffini A., Sidorov-Biryukov D.A., Zheltikov A.M. // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2001. – Т. 72. – № 5. – С. 575–582. JIF WoS: 2.277 / 0,92 п.л. / вклад соискателя 40%.
66. Коноров С.О. Четырехволновое взаимодействие в полых фотонно-кристаллических волокнах / Федотов А.Б., Желтиков А.М. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2003. – Т. 77. – № 4. – С. 471–475. ИФ РИНЦ: 0.818 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 50%.
67. Fedotov A.B. Coherent anti-stokes raman scattering in isolated air-guided modes of a hollow-core photonic-crystal fiber / Konorov S.O., Mitrokhin V.P., Serebryannikov E.E., Zheltikov A.M. // *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*. – 2004. – Т. 70. – № 4. – 045802. JIF WoS: 1.664 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 40%.
68. Konorov S.O. Phase-matched waveguide four-wave mixing scaled to higher peak powers with large-core-area hollow photonic-crystal fibers / Serebryannikov E.E., Fedotov A.B., Miles R.B., Zheltikov A.M. // *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. – 2005. – Т. 71. – № 5. – 057603. JIF WoS: 1.453 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 40%.
69. Kondratev Yu.N. Hollow-core photonic-crystal lightguide for nonlinear spectroscopy of gaseous media / Khokhlov A.V., Shevandin V.S., Zheltikov A.M., Konorov S.O., Fedotov A.B. // *Journal of Optical Technology*. – 2005. – Т. 72. – № 7. – С. 551–553. JIF WoS: 0.192 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 40%.
70. Konorov S.O. Phase-matched coherent anti-stokes raman scattering in isolated air-guided modes of hollow photonic-crystal fibers / Fedotov A.B., Serebryannikov E.E., Mitrokhin V.P., Sidorov-Biryukov D.A., Zheltikov A.M. // *Journal of Raman Spectroscopy*. – 2005. – Т. 36. – № 2. – С. 129–133. JIF WoS: 1.974 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 40%.
71. Konorov S.O. Enhanced four-wave mixing in a hollow-core photonic-crystal fiber / Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2003. – Т. 28. – № 16. – С. 1448–1450. JIF WoS: 4.389 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 40%.
72. Konorov S.O. Phase-matched four-wave mixing and sensing of water molecules by coherent anti-stokes raman scattering in large-core-area hollow photonic-crystal fibers / Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Miles R.B. // *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*. – 2005. – Т. 22. – № 9. – С. 2049–2053. JIF WoS: 3.024 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 40%.

73. Fedotov I.V. Raman-resonance-enhanced composite nonlinearity of air-guided modes in hollow photonic-crystal fibers / Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2006. – Т. 31. – № 17. – С. 2604–2606. JIF WoS: 4.786 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 40%.
74. Федотов И.В. Нелинейно-оптическая спектронаноскопия световодных микроструктур / Федотов А.Б., Кондратьев Ю.Н., Шевандин В.С., Дукельский К.В., Хохлов А.В., Желтиков А.М. // *Российские нанотехнологии*. – 2007. – Т. 2. – № 1-2. – С. 140–144. ИФ РИНЦ: 0.886 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 40%.
75. Fedotov I.V. Spectronanoscropy of photonic wires and supercontinuum generation by parametrically coupled raman sidebands / Fedotov A.B., Sidorov-Biryukov D.A., Dukelskii K.V., Shevandin V.S., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2008. – Т. 33. – № 8. – С. 800–802. JIF WoS: 4.323 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 40%.
76. Федотов И.В. Нелинейно-оптическое преобразование наносекундных лазерных импульсов и управляемая генерация суперконтинуума в микроструктурированных световодах / Федотов А.Б., Желтиков А.М. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2007. – Т. 132. – № 5. – С. 1017–1025. ИФ РИНЦ: 0.916 / 1,04 п.л. / вклад соискателя 40%.
77. Mitrokhin V.P. Coherent anti-stokes raman scattering microspectroscopy of silicon components with a photonic-crystal fiber frequency shifter / Fedotov A.B., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2007. – Т. 32. – № 23. – С. 3471–3473. JIF WoS: 4.935 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 40%.
78. Mitrokhin V.P. Two-photon absorption-induced effects in femtosecond coherent anti-stokes raman-scattering microspectroscopy of silicon photonic components / Fedotov A.B., Ivanov A.A., Podshivalov A.A., Kashkarov P.K., Alfimov M.V., Sakoda K., Zheltikov A.M. // *Laser Physics*. – 2008. – Т. 18. – № 12. – С. 1411–1415. JIF WoS: 0.747 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 40%.
79. Lanin A.A. Ultrafast three-dimensional submicrometer-resolution readout of coherent optical-phonon oscillations with shaped unamplified laser pulses at 20 MHz / Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2012. – Т. 37. – № 9. – С. 1508–1510. JIF WoS: 4.287 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 40%.
80. Lanin A.A. Broadly wavelength- and pulse width-tunable high-repetition rate light pulses from soliton self-frequency shifting photonic crystal fiber integrated with a frequency doubling crystal // Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2012. – Т. 37. – № 17. – С. 3618–3620. JIF WoS: 4.287 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 40%.
81. Ivanov A.A. Pulse-width-tunable 0.7 W mode-locked Cr: forsterite laser / Voronin A.A., Lanin A.A., Sidorov-Biryukov D.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2014. – Т. 39. – № 2. – С. 205–208. JIF WoS: 4.282 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 40%.
82. Savvin A.D. Coherent anti-stokes raman metrology of phonons powered by photonic-crystal fibers / Lanin A.A., Voronin A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2010. – Т. 35. – № 7. – С. 919–921. JIF WoS: 4.093 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 30%.
83. Doronina-Amitonova L.V. Nonlinear-optical brain anatomy by harmonic-generation and coherent raman microscopy on a compact femtosecond laser platform / Lanin A.A., Ivashkina O.I., Zots M.A., Fedotov A.B., Anokhin K.V., Zheltikov A.M. // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Т. 99. – № 23. – С. 231109. JIF WoS: 4.364 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 20%.
84. Voronin A.A. Ionization penalty in nonlinear raman neuroimaging / Fedotov I.V., Amitonova L.V., Ivashkina O.I., Zots M.A., Fedotov A.B., Anokhin K.V., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2011. – Т. 36. – № 4. – С. 508–510. JIF WoS: 4.425 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 20%.
85. Doronina L.V. Tailoring the soliton output of a photonic crystal fiber for enhanced two-photon excited luminescence response from fluorescent protein biomarkers and neuron activity reporters / Fedotov I.V., Voronin A.A., Ivashkina O.I., Zots M.A., Anokhin K.V.,

- E. V. Rostova, Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Letters*. – 2009. – Т. 34. – № 21. – С. 3373–3375. JIF WoS: 4.350 / 0,35 п.л. / вклад соискателя 20%.
86. Доронина-Амитонова Л.В. Нейрофотоника: оптические методы исследования и управления мозгом / Федотов И.В., Федотов А.Б., Анохин К.В., Желтиков А.М. // *Успехи физических наук*. – 2015. – Т. 185. – № 4. – С. 371–392. ИФ РИНЦ: 1.947 / 2,54 п.л. / вклад соискателя 20%.
87. Chebotarev A.S. Ultrafast supercontinuum sculpting for two-photon spectroscopy and microscopy of ratiometric fluorescent indicators / Raevsky R.I., Linovsky G.N., Kostyuk A.I., Belousov V.V., Fedotov A.B., Bilan D.S., Lanin A.A. // *Applied Physics Letters*. – 2024. – Т. 124. – № 24. – 243704. JIF WoS: 3.462 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 10%.
88. Chebotarev A.S. Multiphoton tools for hydrogen peroxide imaging in vivo with subcellular resolution / Kelmanson I.V., Ivanova A.D., Khramova Y.V., Katrukha V.A., Kotova D.A., Raevskii R.I., Moschenko A.A., Linovsky G.N., Fedotov A.B., Belousov V.V., Bilan D.S., Lanin A.A. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2024. – Т. 410. – 135646. JIF WoS: 8.464 / 1,27 п.л. / вклад соискателя 10%.
89. Chebotarev A.S. Single-beam dual-color alternate-pathway two-photon spectroscopy: Toward an optical toolbox for redox biology / Lanin A.A., Raevskii R.I., Kostyuk A.I., Smolyarova D.D., Bilan D.S., Savitskii I.V., Fedotov A.B., Belousov V.V., Zheltikov A.M. // *Journal of Raman Spectroscopy*. – 2021. – Т. 52. – № 9. – С. 1552–1560. JIF WoS: 2.561 / 1,04 п.л. / вклад соискателя 10%.
90. Petrov N.L. High-brightness photon pairs and strongly antibunching heralded single photons from a highly nonlinear optical fiber / Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Optics Communications*. – 2019. – Т. 450. – № 1. – С. 304–307. JIF WoS: 2.417 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 40%.
91. Petrov N.L. Polarization map of correlated sideband generation in vectorial four-wave mixing / Voronin A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Т. 110. – № 18. – 181108. JIF WoS: 3.684 / 0,46 п.л. / вклад соискателя 20%.
92. Petrov N.L. Entropy- and purity-tailored broadband entanglement from vectorial four-wave mixing: Insights from pulse modes and classical-field dynamics / Voronin A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*. – 2019. – Т. 100. – № 3. – 033837. JIF WoS: 2.937 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 30%.
93. Petrov N.L. Ultrahigh-contrast cross-polarized entangled photon pairs from a strongly birefringent photonic-crystal fiber / Voronin A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. // *Applied Physics B*. – 2019. – Т. 125. – 54. JIF WoS: 2.573 / 0,69 п.л. / вклад соискателя 30%.
94. Petrovniin K.V. Broadband quantum light on a fiber-optic platform: from biphotons and heralded single photons to bright squeezed vacuum / Smirnov M.A., Fedotov I.V., Voronin A.A., Latypov I.Z., Shmelev A.G., Talipov A.A., Matveeva T.V., Fedotov A.B., Moiseev S.A., Zheltikov A.M. // *Laser Physics Letters*. – 2019. – Т. 16. – № 7. – 075401. JIF WoS: 2.221 / 0,58 п.л. / вклад соискателя 20%.
95. Хайруллин А.Ф. Источник междиапазонных фотонных пар на основе фотонно-кристаллического волокна с непрерывной накачкой / Смирнова А.М., Арсланов Н.М., Федотов А.Б., Моисеев С.А., Федотов И.В., Смирнов М.А. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2024. – Т. 119. – № 5. – С. 336–342. ИФ РИНЦ: 0.731 / 0,81 п.л. / вклад соискателя 20%.
96. Старшинов Н.С. Четырехфотонное смешение в фантомной волоконной спектроскопии / Белинский А.В., Федотов А.Б. // *Квантовая электроника*. – 2023. – Т. 53. – № 9. – С. 725–730. ИФ РИНЦ: 0.906 / 0,69 п.л. / вклад соискателя 50%.

Патент РФ. «Сенсорное устройство на основе планарных и цилиндрических полых световодов с интегрированной интерферометрической системой». Авторы: Федотов А.Б., Желтиков А.М. Номер: 2432568 Дата публикации патента: 27 октября 2011 г.

Основная цитируемая литература.

1. Agrawal G. Nonlinear Fiber Optics. Fifth Edition. Boston: Academic Press, 2013. 629 p.
2. Knight J.C. et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 1996. Vol. 21, № 19. P. 1547–1549.
3. Knight J.C. et al. Photonic band gap guidance in optical fibers // Science. 1998. Vol. 282, № 5393. P. 1476–1478.
4. Monro T.M. et al. Holey Optical Fibers: An Efficient Modal Model // J. Light. Technol. IEEE, 1999. Vol. 17, № 6. P. 1093.
5. Russell P. Photonic crystal fibers // Science. 2003. Vol. 299, № 5605. P. 358–362.
6. Желтиков А.М. Оптика микроструктурированных волокон. Наука. Москва, 2004.
7. Желтиков А.М. Дырчатые волноводы // Успехи Физических Наук. 2000. Vol. 170, № 11. P. 1203–1215.
8. Ranka J.K., Windeler R.S., Stentz A.J. Optical properties of high-delta air-silica microstructure optical fibers // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 2000. Vol. 25, № 11. P. 796–798.
9. Dudley J.M., Genty G., Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber // Rev. Mod. Phys. American Physical Society, 2006. Vol. 78, № 4. P. 1135–1184.
10. Желтиков А.М. Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами // Успехи Физических Наук. 2006. Vol. 176, № 6. P. 623–649.
11. Дианов Е.М. et al. ВКР-преобразование многосолитонных импульсов в кварцевых волоконных световодах // Письма В ЖЭТФ. 1985. Vol. 41. P. 242–244.
12. Mitschke F.M., Mollenauer L.F. Discovery of the soliton self-frequency shift // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 1986. Vol. 11, № 10. P. 659–661.
13. Wai P.K.A., Chen H.H., Lee Y.C. Radiations by “solitons” at the zero group-dispersion wavelength of single-mode optical fibers // Phys. Rev. A. American Physical Society, 1990. Vol. 41, № 1. P. 426–439.
14. Akhmediev N., Karlsson M. Cherenkov radiation emitted by solitons in optical fibers // Phys. Rev. A. American Physical Society, 1995. Vol. 51, № 3. P. 2602–2607.
15. Zheltikov A. Multimode guided-wave non-3omega third-harmonic generation by ultrashort laser pulses // JOSA B. Optica Publishing Group, 2005. Vol. 22, № 10. P. 2263–2269.
16. Ortigosa-Blanch A. et al. Highly birefringent photonic crystal fibers // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 2000. Vol. 25, № 18. P. 1325–1327.
17. Apolonski A. et al. Spectral shaping of supercontinuum in a cobweb photonic-crystal fiber with sub-20-fs pulses // JOSA B. Optica Publishing Group, 2002. Vol. 19, № 9. P. 2165–2170.
18. Hu M.L. et al. Frequency-tunable anti-Stokes line emission by eigenmodes of a birefringent microstructure fiber // Opt. Express. Optica Publishing Group, 2004. Vol. 12, № 9. P. 1932–1937.
19. Hu M.-L. et al. Polarization-demultiplexed two-color frequency conversion of femtosecond pulses in birefringent photonic-crystal fibers // Opt. Express. Optica Publishing Group, 2005. Vol. 13, № 16. P. 5947–5952.
20. Гордиенко В.М. Твердотельная фемтосекундная лазерная система на Cr:forsterite: перспективы использования в фундаментальных исследованиях и в создании критических фемтотехнологий. МГУ, Москва: Препринт физического факультета №13/2000, 2000.

21. Migal E.A., Potemkin F.V., Gordienko V.M. Highly efficient optical parametric amplifier tunable from near- to mid-IR for driving extreme nonlinear optics in solids // *Opt. Lett. Optica Publishing Group*, 2017. Vol. 42, № 24. P. 5218–5221.
22. Mitschke F.M., Mollenauer L.F. Discovery of the soliton self-frequency shift // *Opt. Lett.* 1986. Vol. 11, № 10. P. 659–661.
23. Liu X. et al. Soliton self-frequency shift in a short tapered air–silica microstructure fiber // *Opt. Lett. Optica Publishing Group*, 2001. Vol. 26, № 6. P. 358–360.
24. Serebryannikov E.E. et al. Soliton self-frequency shift of 6-fs pulses in photonic-crystal fibers // *Appl. Phys. B.* 2005. Vol. 81, № 5. P. 585–588.
25. Serebryannikov E.E. et al. Nonlinear-optical spectral transformation of few-cycle laser pulses in photonic-crystal fibers // *Phys. Rev. E. American Physical Society*, 2005. Vol. 72, № 5. P. 056603.
26. Teisset C.Y. et al. Soliton-based pump-seed synchronization for few-cycle OPCPA // *Opt. Express. Optica Publishing Group*, 2005. Vol. 13, № 17. P. 6550–6557.
27. Cregan R.F. et al. Single-Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air // *Science. American Association for the Advancement of Science*, 1999. Vol. 285, № 5433. P. 1537–1539.
28. Желтиков А.М. Нелинейная оптика микроструктурированных волокон // *Успехи Физических Наук.* 2004. Vol. 174, № 1. P. 73–105.
29. Ахманов С.А., Коротеев Н.И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. Наука. Москва, 1981. 543 p.
30. Eesley G.L. Coherent Raman Spectroscopy. Pergamon Press, 1981. 142 p.
31. Eckbreth A.C. Laser Diagnostics for Temperature and Species in Unsteady Combustion // *Unsteady Combustion / ed. Culick F., Heitor M.V., Whitelaw J.H. Dordrecht: Springer Netherlands*, 1996. P. 393–410.
32. Miles R.B., Laufer G., Bjorklund G.C. Coherent anti-Stokes Raman scattering in a hollow dielectric waveguide // *Appl. Phys. Lett.* 1977. Vol. 30, № 8. P. 417–419.
33. Knight J.C. Photonic crystal fibres // *Nature. Nature Publishing Group*, 2003. Vol. 424, № 6950. P. 847–851.
34. Ivanov A.A., Podshivalov A.A., Zheltikov A.M. Frequency-shifted megawatt soliton output of a hollow photonic-crystal fiber for time-resolved coherent anti-Stokes Raman scattering microspectroscopy // *Opt. Lett. Optica Publishing Group*, 2006. Vol. 31, № 22. P. 3318–3320.
35. Sidorov-Biryukov D.A., Serebryannikov E.E., Zheltikov A.M. Time-resolved coherent anti-Stokes Raman scattering with a femtosecond soliton output of a photonic-crystal fiber // *Opt. Lett. Optica Publishing Group*, 2006. Vol. 31, № 15. P. 2323–2325.
36. Paulsen H.N. et al. Coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy with a photonic crystal fiber based light source // *Opt. Lett. Optica Publishing Group*, 2003. Vol. 28, № 13. P. 1123–1125.
37. Konorov S.O. et al. Cross-correlation frequency-resolved optical gating coherent anti-Stokes Raman scattering with frequency-converting photonic-crystal fibers // *Phys. Rev. E. American Physical Society*, 2004. Vol. 70, № 5. P. 057601.
38. Andresen E.R. et al. Broadband multiplex coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy employing photonic-crystal fibers // *JOSA B. Optica Publishing Group*, 2005. Vol. 22, № 9. P. 1934–1938.
39. Желтиков А.М. Микроструктурированные световоды для нового поколения волоконно-оптических источников и преобразователей световых импульсов // *Успехи Физических Наук.* 2007. Vol. 177, № 7. P. 737–762.

40. Palero J.A. et al. Short-wavelength two-photon excitation fluorescence microscopy of tryptophan with a photonic crystal fiber based light source // *Opt. Express*. Optica Publishing Group, 2005. Vol. 13, № 14. P. 5363–5368.
41. Isobe K. et al. Multi-Spectral Two-Photon Excited Fluorescence Microscopy Using Supercontinuum Light Source // *Jpn. J. Appl. Phys.* IOP Publishing, 2005. Vol. 44, № 1L. P. L167.
42. McConnell G., Riis E. Two-photon laser scanning fluorescence microscopy using photonic crystal fiber // *J. Biomed. Opt.* 2004. Vol. 9, № 5. P. 922–927.
43. Kano H., Hamaguchi H. In-vivo multi-nonlinear optical imaging of a living cell using a supercontinuum light source generated from a photonic crystal fiber // *Opt. Express*. Optica Publishing Group, 2006. Vol. 14, № 7. P. 2798–2804.
44. Kano H., Hamaguchi H. Supercontinuum dynamically visualizes a dividing single cell // *Anal. Chem.* 2007. Vol. 79, № 23. P. 8967–8973.
45. Yoneyama H. et al. Invited Article: CARS molecular fingerprinting using sub-100-ps microchip laser source with fiber amplifier // *APL Photonics*. 2018. Vol. 3, № 9. P. 092408.
46. Lefort C. et al. Multicolor multiphoton microscopy based on a nanosecond supercontinuum laser source // *J. Biophotonics*. 2016. Vol. 9, № 7. P. 709–714.
47. Liu Y. et al. Multimodal Nonlinear Microscopy by Shaping a Fiber Supercontinuum From 900 to 1160 nm // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. Publ. IEEE Lasers Electro-Opt. Soc.* 2012. Vol. 18, № 3.
48. Tu H. et al. Stain-free histopathology by programmable supercontinuum pulses // *Nat. Photonics*. 2016. Vol. 10, № 8. P. 534–540.
49. Knill E., Laflamme R., Milburn G.J. A scheme for efficient quantum computation with linear optics // *Nature*. Nature Publishing Group, 2001. Vol. 409, № 6816. P. 46–52.
50. Ekert A., Knight P.L. Entangled quantum systems and the Schmidt decomposition // *Am. J. Phys.* 1995. Vol. 63, № 5. P. 415–423.
51. Klyshko D.N. Coherent Photon Decay in a Nonlinear Medium. 1967.
52. Wang L.J., Hong C.K., Friberg S.R. Generation of correlated photons via four-wave mixing in optical fibres // *J. Opt. B Quantum Semiclassical Opt.* 2001. Vol. 3, № 5. P. 346.
53. Garay-Palmett K. et al. Photon pair-state preparation with tailored spectral properties by spontaneous four-wave mixing in photonic-crystal fiber // *Opt. Express*. Optica Publishing Group, 2007. Vol. 15, № 22. P. 14870–14886.
54. Single-Photon Generation and Detection /ed. Migdall A. et al. Elsevier, 2013. Vol. 45. 562 p.
55. Garay-Palmett K. et al. Fiber-based photon-pair generation: tutorial // *JOSA B. Optica Publishing Group*, 2023. Vol. 40, № 3. P. 469–490.
56. Javanainen J., Gould P.L. Linear intensity dependence of a two-photon transition rate // *Phys. Rev. A. American Physical Society*, 1990. Vol. 41, № 9. P. 5088–5091.
57. Yabushita A., Kobayashi T. Spectroscopy by frequency entangled photon pairs // *Phys. Rev. A*. 2003. Vol. 69. P. 013806.