

На правах рукописи



Сорокин Арсений Андреевич

**ФОРМИРОВАНИЕ СЖАТЫХ СОСТОЯНИЙ СВЕТА
И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ФАЗЫ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ
С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОЛОКОН
С ВЫСОКОЙ КЕРРОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ**

1.3.19. Лазерная физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: Анашкина Елена Александровна, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Биленко Игорь Антонович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова, (г. Москва)

Пряников Андрей Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Института Общей Физики им. А. М. Прохорова РАН», (г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится «27» ноября 2023 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте rfpan.ru ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Автореферат разослан «25» октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Э.Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования

Оптические волокна широко используются для различных приложений, наиболее известным из которых являются телекоммуникации. Благодаря хорошо развитой телекоммуникационной базе в диапазоне длин волн около 1.5 мкм и возможности управления параметрами волокон, разработка волоконных источников излучения с заданными характеристиками для различных приложений представляет огромный интерес. Волоконные лазерные источники и нелинейно-оптические устройства позволяют реализовать эффективное преобразование энергии накачки в энергию излучения благодаря волноводной геометрии, осуществлять эффективный теплоотвод и обеспечивать высокое качество лазерного пучка [1,2]. Мощным толчком для развития волоконной оптики, включающей, в том числе, классическую нелинейную оптику и квантовую оптику, явилось создание технологии изготовления кварцевых волокон с очень малыми потерями (минимальное значение составляет 0.2 дБ/км на длине волны около 1.55 мкм [1]). Многие нелинейно-оптические эффекты, впрочем, как и квантовые, основаны на использовании кубичной керровской нелинейности [1,3]. При воздействии интенсивного света на среду с кубичной нелинейностью показатель преломления n начинает зависеть от интенсивности I следующим образом: $n = n_0 + n_2 \times I$, где n_0 – линейный показатель преломления, а n_2 – нелинейный показатель преломления [1]. Нелинейный показатель преломления кварцевого стекла составляет $n_2 \sim 2.5 \times 10^{-20}$ м²/Вт [1]. Несмотря на то, что это значение значительно меньше, чем нелинейные показатели преломления многих кристаллических сред и жидкостей, при распространении лазерного излучения в оптических волокнах благодаря достаточно сильной локализации электромагнитного поля моды вблизи сердцевинны и большим трассам распространения возможно эффективное нелинейное взаимодействие и эффективная реализация различных процессов, приводящих к формированию состояний света с требуемыми свойствами. Более того, использование ультракоротких импульсов позволяет достигать относительно высокие пиковые интенсивности излучения при малых средних мощностях и реализовывать различные управляемые процессы за счет керровской нелинейности, что представляет неугасающий интерес [1,2].

Огромную значимость для волоконной оптики представляет изучение новых материалов, свойства которых могут значительно отличаться от плавленого кварца, что позволяет расширять границы нелинейных и квантовых эффектов на их основе [4,5,6,7]. Подходящими материалами являются специальные так называемые низкотемпературные стекла с нелинейным показателем преломления на 1-3 порядка выше, чем n_2 кварцевого стекла [4,5]. В качестве таких стекол в данной работе исследовались теллуридные стекла на основе диоксида теллура ($n_2 \sim 5-6 \times 10^{-19}$ м²/Вт [5]) и халькогенидные стекла на основе сульфида мышьяка ($n_2 \sim 3 \times 10^{-18}$ м²/Вт [5]) и селенида мышьяка (n_2

$\sim 1 \times 10^{-17}$ м²/Вт [5]). Кроме того, диапазон прозрачности этих стекол гораздо шире, чем диапазон прозрачности кварцевых стекол. Длинноволновые границы прозрачности для них расположены в среднем ИК диапазоне (около 5 мкм для теллуридных стекол, около 8 мкм для As₂S₃ стекол и около 12 мкм для As₂Se₃ стекла), в то время как кварцевые волокна практически непрозрачны при длинах волн >2.3 мкм [4,5]. Применение теллуридных и халькогенидных волокон для создания источников классического света с управляемыми характеристиками достаточно успешно реализуется многими научными группами и даже коммерческими компаниями [4,6]. Более того, как показано в диссертационной работе, теллуридные и халькогенидные волокна с высокой керровской нелинейностью могут использоваться в качестве нелинейных элементов в методе характеристики спектральной фазы ультракоротких импульсов, что особенно актуально в среднем ИК диапазоне, где использование стандартных методов зачастую затруднительно. Применение халькогенидных волокон и других элементов на основе халькогенидных стекол в квантовой оптике на сегодняшний день распространено в значительно меньшей степени, но тем не менее вызывает возрастающий интерес для реализации квантово-оптических источников, преимущественно основанных на генерации коррелированных фотонных пар [7].

Значительная часть диссертационного исследования находится на стыке направлений квантовой оптики и нелинейной волоконной оптики, в том числе, с использованием как кварцевых, так и новых высоконелинейных специальных волокон. В частности, теоретически исследуется генерация яркого сжатого света – неклассических многофотонных состояний с флуктуациями одной из квадратурных компонент поля меньше стандартного квантового предела [8,A2]. Область квантовой оптики, оперирующая состояниями с макроскопическими значениями амплитуд и интенсивностей полей, но при этом с хорошо выраженными неклассическими свойствами, привлекает в последнее время большое внимание. Данные состояния света имеют принципиальное значение для разработки следующего поколения высокочувствительных датчиков для многочисленных приложений, варьирующихся от физики высоких энергий до биохимии, а также для новых платформ микроскопии, способных определять свойства материалов, которые ранее были недоступны для исследования из-за квантовых флуктуаций [9,A3]. Сжатый свет представляет особый интерес для детектирования гравитационных волн [9], и разработка новых источников с высокой степенью сжатия является очень востребованной для этой цели задачей. Более того, генерация сжатых состояний света непосредственно связана с возможностью получения другого очень важного класса неклассических состояний, а именно, перепутанных состояний, играющих принципиальную роль в квантовых вычислениях с непрерывными переменными, квантовой криптографии и квантовых сетях. Непосредственная совместимость источников неклассического света с волоконно-оптическими компонентами является важным преимуществом с точки зрения применений

в квантовых телекоммуникациях. Также одной из важных проблем квантовой оптики является расширение доступного диапазона длин волн источников сжатого света. Поэтому изучение возможности использования альтернативных материалов для построения волоконных источников яркого сжатого света за пределами хорошо освоенного полуторамикронного диапазона также представляется весьма актуальным направлением.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование новых возможностей использования керровской нелинейности специальных оптических волокон в задачах квантовой и классической оптики, включая квантовое сжатие флуктуаций лазерного излучения и измерение спектральной фазы ультракоротких импульсов.

Задачи диссертационной работы:

1. Разработка теоретической модели и численного кода на ее основе для моделирования поляризационного керровского сжатия квантовых флуктуаций ультракороткого и непрерывного лазерного излучения при распространении в специальных волокнах на основе различных стекол.
2. Теоретическое исследование и оптимизация поляризационного керровского сжатия квантовых флуктуаций лазерных сигналов в кварцевых, теллуридных и халькогенидных волокнах с учетом эффектов рамановского рассеяния и потерь, принципиально ограничивающих сжатие.
3. Разработка нового простого и эффективного алгоритма обработки экспериментальных данных для восстановления спектральной фазы ультракоротких лазерных импульсов, основанного на ее аппроксимации оптимальной полиномиальной функцией, по трем спектрам – фундаментальному (исходному) и двум спектрам, преобразованным в оптическом волокне с керровской нелинейностью при разных значениях B -интеграла.
4. Исследование новых возможностей метода восстановления спектральной фазы по трем спектрам по численно смоделированным и экспериментально измеренным данным с применением различных алгоритмов, включая предложенный алгоритм и итерационный алгоритм типа Гершберга-Сакстона, при использовании в качестве нелинейных керровских элементов кварцевых, теллуридных и халькогенидных волокон.

Научная новизна

1. Впервые в рамках математической модели, реалистично описывающей эволюцию лазерных сигналов в специальных кварцевых оптических волокнах, детально исследовано влияние различных факторов (рамановских эффектов, потерь в волокне) и параметров системы (энергии и длительности

импульсов, длины волокон) на керровское сжатие квантовых флуктуаций ультракоротких импульсов; проведена оптимизация и найдены связи между параметрами системы для достижения максимального сжатия; выявлены ограничивающие факторы для различных условий.

2. Проведено обобщение математической модели, позволившее использовать ее для моделирования квантового сжатия лазерных сигналов в специальных волокнах на основе теллуридных и халькогенидных стекол с высокой керровской нелинейностью с учетом их особенностей. Предложено и впервые детально исследовано с помощью данной модели сжатие квантовых флуктуаций непрерывного излучения в таких волокнах; выявлены ограничивающие факторы, найдены оптимальные параметры системы и ожидаемые при этом значения сжатия квантовых флуктуаций.

3. Предложен новый простой и эффективный алгоритм обработки экспериментальных данных для восстановления спектральной фазы ультракоротких импульсов по трем спектрам – фундаментальному (исходному) и двум спектрам, преобразованным в оптическом волокне с керровской нелинейностью при разных значениях B -интеграла. Алгоритм основан на аппроксимации спектральной фазы полиномиальной функцией и оптимизации полиномиальных коэффициентов и позволяет расширить область применения разработанных ранее алгоритмов. Предложенный алгоритм впервые применен для восстановления спектральной фазы по экспериментально измеренным данным.

4. Предложено и теоретически продемонстрировано применение метода восстановления спектральной фазы ультракоротких импульсов в трехмикронном диапазоне длин волн по трем спектрам – фундаментальному (исходному) и двум преобразованным спектрам в халькогенидных и теллуридных волокнах. Применимость данного метода и различных алгоритмов обработки данных за пределами телекоммуникационного диапазона исследована впервые.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы могут применяться в ряде российских научно-исследовательских организаций, таких как ИПФ РАН, ИОФ РАН, РКЦ, ИТМО, ИХВВ РАН, ФИАН, ИЛФ СО РАН, ИАиЭ СО РАН и др.

Разработанная модель для теоретического исследования керровского сжатия квантовых флуктуаций непрерывного и импульсного лазерного излучения в кварцевых и специальных волокнах может применяться при исследовании подобного типа задач. Аналитические и численные результаты исследования и оптимизации керровского квантового сжатия могут применяться при разработке источников неклассического света с уровнем флуктуаций значительно ниже стандартного квантового предела для одной из квадратурных компонент. Такие источники востребованы для многих практических приложений, включая квантовое зондирование и прецизионную квантовую метрологию, а

также для получения неклассических перепутанных состояний, играющих принципиальную роль в квантовых вычислениях с непрерывными переменными, квантовой криптографии и квантовых сетях.

Результаты, связанные с разработкой нового алгоритма обработки экспериментальных данных в неинтерферометрическом методе измерения спектральной фазы ультракоротких импульсов, основанном на измерении исходного спектра оптического сигнала и двух преобразованных в волокнах с керровской нелинейностью спектров, могут применяться для эффективной однозначной характеристики широкого класса ультракоротких оптических сигналов. Результаты исследований данного метода с применением различных алгоритмов могут применяться, в том числе, для восстановления спектральной фазы ультракоротких лазерных импульсов в диапазоне длин волн около 3 мкм, где применение более стандартных методов может ограничиваться недостаточно развитой в этом спектральном диапазоне компонентной базой.

Методология и методы исследования

В работе использовались надежные и хорошо апробированные методы численного моделирования, проверенные на известных моделях. Моделирование обобщенного нелинейного уравнения Шрёдингера выполнено на основе метода Фурье разделения по физическим факторам (SSFM) с помощью специально разработанного автором численного кода. Моделирование квантовых свойств излучения производилось в предположении гауссовой формы функции Вигнера квантового состояния, обоснованном для рассматриваемых параметров системы. Также применялись аналитические методы, позволяющие получать решения соответствующих уравнений в предельных случаях в пренебрежении некоторыми эффектами. Для расчета параметров волокон из различных стекол применялся хорошо известный электродинамический подход, основанный на решении характеристических уравнений, получаемых на основе системы уравнений Максвелла с учетом граничных условий.

Положения, выносимые на защиту

1. В специальных кварцевых волокнах при оптимальных параметрах системы поляризационное керровское сжатие квантовых флуктуаций ультракоротких импульсов, рассчитанное без учета потерь в системе детектирования, может достигать уровня -20 дБ. При длительности солитонных импульсов ≥ 0.5 пс оптические потери в волокне ограничивают квантовое сжатие, а рамановские эффекты незначительны, в то время как при длительностях ≤ 0.2 пс сжатие ограничивается рамановскими эффектами. Существует оптимальная длительность солитонов (~ 0.4 пс), обеспечивающая наиболее сильное сжатие, при достижении баланса между ограничивающими факторами.

2. Генерация неклассических состояний непрерывного лазерного излучения 10-Вт класса мощности в двухмикронном диапазоне длин волн со сжатыми квантовыми флуктуациями сильнее -10 дБ может быть получена в теллуритных и халькогенидных волокнах с нелинейными керровскими коэффициентами на 2-4 порядка выше, чем у стандартных кварцевых волокон. Для специального волокна из As_2Se_3 стекла теоретически достижимое предельное керровское квантовое сжатие составляет -20 дБ, в то время как для коммерческих волокон из As_2S_3 стекла и специальных теллуритных волокон теоретический предел сжатия находится в диапазоне значений $-20 \dots -15$ дБ (без учета потерь в схеме детектирования).
3. Для восстановления спектральной фазы ультракоротких импульсов в методе, основанном на измерении исходного спектра оптического сигнала и двух спектров, преобразованных в волокнах с керровской нелинейностью, может применяться алгоритм обработки данных на основе аппроксимации спектральной фазы полиномиальной функцией и оптимизации ее коэффициентов при глобальной минимизации функции ошибок.
4. Восстановление фазы ультракоротких импульсов длительностью от нескольких сотен фс до нескольких десятков пс в трехмикронном диапазоне длин волн может быть выполнено с помощью метода на основе измерения исходного спектра оптического сигнала и двух спектров, преобразованных в волокнах с керровской нелинейностью, при использовании прозрачных в данном диапазоне теллуритных и халькогенидных волокон.

Достоверность полученных результатов

Все представленные результаты диссертационного исследования являются достоверными и обоснованными. В работе применялись надежные и апробированные методы и подходы. Разработанные алгоритмы и программы для численного моделирования тщательно тестировались на известных моделях. Полученные численные и аналитические результаты хорошо согласуются между собой. Кроме того, для ряда теоретических результатов есть экспериментальная верификация. Положения и основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных журналах и подвергались оценке независимых международных экспертов. Результаты докладывались на всероссийских и международных симпозиумах, конференциях, школах и обсуждались на научных семинарах.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были доложены автором лично на следующих конференциях и научных школах:

- V and VI International Conferences on Ultrafast Optical Science “UltrafastLight-2021” and “UltrafastLight-2022”, Москва;

- 19th and 20th International Conferences Laser Optics (ICLO 2020) and (ICLO 2022), Санкт-Петербург;
- 21st and 22nd International Conferences on Numerical Simulation of Opto-electronic Devices “NUSOD 2021” and “NUSOD 2022”, online, Turin, Italy;
- The 4th international conference "Quantum Optics and Photonics 2021", online, Riga, Latvia;
- International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics” (NWP-2021), Нижний Новгород;
- Международные конференции «XIX и XX научные школы "Нелинейные волны – 2020" и "Нелинейные волны – 2022"», Нижний Новгород;
- XVII Всероссийская конференция «Высокочистые вещества. Получение, анализ, применение» и X Школа молодых ученых «Особо чистые стекла для волоконной оптики», Нижний Новгород, 2022;
- 26 Нижегородская Сессия молодых ученых, Нижний Новгород, 2021;
- X Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2017», Санкт-Петербург.

Результаты работы обсуждались на семинарах в ИПФ РАН и Институте физики света Общества Макса Планка (Эрланген, Германия).

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (конкурс на получение индивидуальных грантов для поддержки талантливых молодых ученых без степени, №22-1-5-24-1). Результаты работы использовались при выполнении проектов в рамках следующих грантов: Мегагрант №14.W03.31.0032(075-15-2021-633), НЦМУ «Центр фотоники» №075-15-2020-906 (075-15-2022-316), РФФИ №19-29-11032, РФФ №20-72-10188.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 11 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых базами Scopus и Web of Science, в том числе, в Optics Express, Nanophotonics, Results in Physics, Mathematics, Laser Physics Letters, Fibers (2 статьи), Photonics, Quantum Electronics, Optics and Spectroscopy, Bulletin of the Lebedev Physics Institute, а также в рецензируемом журнале Автометрия, индексируемом в RSCI.

Личный вклад автора

Все теоретические результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором или при его непосредственном участии. Постановка задач, определение подходов к их решению, анализ, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем Е.А. Анашкиной, а также с А.В. Андриановым и Г. Лойхсом (G. Leuchs). Экспериментальные данные, использованные для верификации теоретических результатов автора, получены и предоставлены А.В. Андриановым и Н.А. Калининым.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, списка статей автора по теме диссертации. Диссертация изложена на 106 страницах, включает 37 рисунков, 6 таблиц. Список литературы содержит 136 наименований, список статей автора в рецензируемых журналах по теме диссертации содержит 12 наименований [A1-A12].

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, аргументированы новизна и научная и практическая значимость работы, описаны методология и методы исследования, представлены выносимые на защиту положения, обоснована достоверность полученных результатов, приведены данные об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

Глава 1 посвящена поляризационному сжатию квантовых флуктуаций ультракоротких лазерных импульсов в кварцевых волокнах, основанному на четырехволновом смешении и нелинейном оптическом эффекте Керра [A1, A2, A3, A8]. Одна из проблем реализации сжатия на данном механизме связана с тем, что требуемый набег нелинейной фазы (или, что то же самое, *B*-интеграл) $r_{\text{Керр}} = \gamma PL$ должен принимать значения в несколько единиц (здесь и далее γ – нелинейный керровский коэффициент, P – пиковая мощность, L – длина волокна). Для непрерывных сигналов это достижимо при высоком уровне мощности и/или при больших длинах волокон (порядка 100 м для стандартных волокон с $\gamma \sim 1$), но на таких длинах происходит паразитное рассеяние на акустических модах вследствие эффекта Манделштама-Бриллюэна. Значительно продвинуться в генерации квантово-сжатого света позволяет использование последовательности ультракоротких оптических импульсов, у которых пиковая мощность на порядки превышает среднюю мощность, что позволяет уменьшить длину волокна [8], однако при этом в качестве ограничивающих факторов могут выступать рамановские эффекты.

В данной работе для эффективного численного исследования сжатия квантовых флуктуаций многофотонного лазерного излучения при его распространении в волокне применялся метод, основанный на восстановлении формы функции Вигнера путем моделирования большого количества стохастических траекторий с использованием стохастического обобщенного нелинейного уравнения Шредингера на комплексную амплитуду поля $A(z, t)$ [10, A8]:

$$\frac{\partial}{\partial z} A(t, z) = i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} A(t, z) - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} A(t, z) + [i\gamma \int_0^\infty dt' R(t-t') |A(t', z)|^2 + \Gamma^R(t, z)] A(t, z) - \frac{\alpha}{2} A(t, z) + \Gamma(t, z) \quad (1)$$

где t – время в сопровождающей системе отсчета, z – координата, β_2 и β_3 – коэффициенты квадратичной и кубичной дисперсии, α – линейные потери, Γ

и I^R — дельта-коррелированные случайные величины с нулевыми средними значениями и нормальным распределением в частотной области, описывающие линейный квантовый шум и рамановский шум, $R(t-t')$ — функция, описывающая детерминированный нелинейный отклик, включая керровский и рамановский вклады. Для моделирования эволюции $A(z, t)$ в качестве начального условия задавалось некоторое распределение сигнала с добавлением нормально распределенного стохастического шума. Моделирование проводилось при помощи разработанного кода на основе метода Фурье расщепления по физическим факторам с использованием быстрого преобразования Фурье.

Выполнялось моделирование распространения большого количества (порядка 10^3) независимых пар x - и y -поляризованных сигналов по оптическому волокну определенной длины. Затем производился расчет параметров Стокса (S_1, S_2) и определялось сжатие поляризационной неопределенности на выходе. Для визуализации расчетов можно нанести набор точек (для всех реализаций), характеризующих состояние поляризации, на плоскость (S_1, S_2). В отсутствие нелинейности эти точки образуют симметричное распределение с неопределенностью, представляющей собой стандартный квантовый предел (рисунок 1(а)). Но после нелинейной эволюции за счет действия керровской нелинейности распределение представляет собой эллипсообразное облако (рисунок 1(б)) с неопределенностью в некотором направлении ниже стандартного квантового предела, что и является сжатием квантовых флуктуаций.

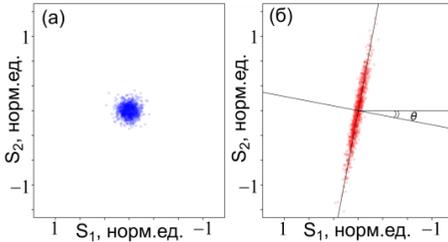


Рисунок 1. Пример распределения точек для исходного когерентного состояния света (а) и сжатого света (б) после распространения в волокне с керровской нелинейностью на плоскости параметров Стокса (S_1, S_2) [A8].

Находилась малая ось для этого облака и вычислялось уменьшение флуктуаций по сравнению с исходным когерентным состоянием. Определялся угол θ , при котором выражение для дисперсии V (в дБ) минимально:

$$V = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\left(\frac{1}{\hbar\omega_0}\right)^2 \langle (S_1 \cos(\theta) + S_2 \sin(\theta))^2 \rangle - \left(\frac{1}{\hbar\omega_0}\right)^2 \langle (S_1 \cos(\theta) + S_2 \sin(\theta)) \rangle^2 - \frac{M}{2}}{\left(\frac{1}{\hbar\omega_0}\right) \langle S_0 \rangle - M} \right) \quad (2)$$

где ω_0 — центральная угловая частота, \hbar — постоянная Планка, M — число мод, используемых в моделировании.

Результаты точного математического моделирования сравнивались с аналитическими оценками, полученными для непрерывных лазерных сигналов с мощностью P_0 в пренебрежении рамановскими эффектами. Без учета оптических потерь сжатие квантовых шумов оценивается по формуле [11]:

$$V_0 = 10 \cdot \log_{10} (1 - 2r_{Kerr} \sqrt{1 + r_{Kerr}^2} + 2r_{Kerr}^2) \quad (3)$$

При прохождении сжатого света через элемент с коэффициентом потерь $R = 1 - 10^{-\kappa/10}$, где κ – «сконцентрированные» на выходе потери в дБ, сжатие шумов ухудшается и оценивается следующим образом [11]:

$$V_{loss} = 10 \cdot \log_{10} \left((1 - R)10^{V_0/10} + R \right). \quad (4)$$

В работе проведено детальное исследование сжатия квантовых шумов оптических солитонов. Известно, что нелинейное уравнение Шрёдингера с учетом только квадратичной дисперсии и керровской нелинейности имеет точное решение в виде фундаментального солитона, комплексная амплитуда которого имеет вид $A_{sol}(t, z) = P^{1/2} \exp(iz \beta_2 / (2t_0^2)) / \cosh(t/t_0)$, где t_0 – характерное время, связанное с длительностью солитона на полувысоте T_{FWHM} соотношением $T_{FWHM} \approx 1.763t_0$ [1]. Для фундаментального солитона $P = |\beta_2| / (\gamma t_0^2)$ [1].

Было выполнено детальное моделирование для солитонов с длительностями 0.1-1 пс. При этом включались и выключались рамановские эффекты и потери в волокне для определения их вклада в сжатие шумов солитонов различной длительности [A8]. На рисунке 2 верхний ряд соответствует моделированию без учета рамановских эффектов, а нижний ряд – моделированию с их учетом. Также оценивалось сжатие V_0 непрерывного сигнала с пиковыми мощностями солитона по формуле (3) и оценивалось сжатие V_{loss} с учетом сосредоточенных потерь $\kappa = \alpha z$ на выходе волокна по формуле (4).

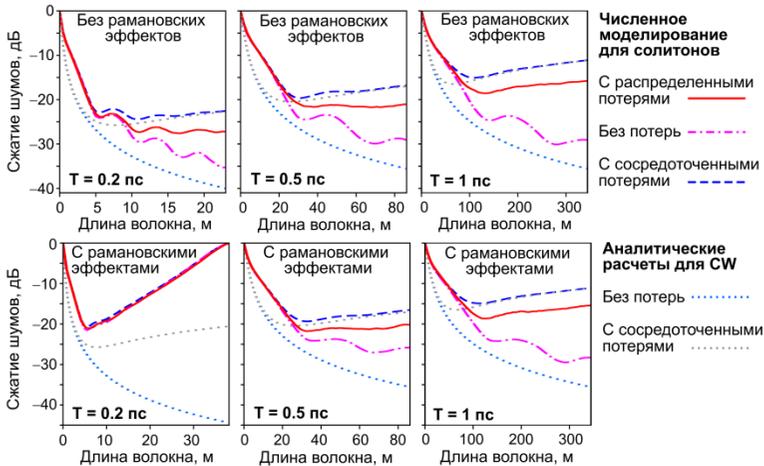


Рисунок 2. Результаты моделирования сжатия шумов солитонов в волокне, полученные без рамановских эффектов (верхний ряд) и с их учетом (нижний ряд) в сравнении с аналитическими оценками по формулам (3) и (4). Параметры, используемые в моделировании: $\beta_2 = -28 \text{ пс}^2/\text{км}$; $\beta_3 = 0$; $\gamma = 0.093 \text{ (Вт} \cdot \text{км)}^{-1}$; $\alpha = 1.0 \text{ дБ/км}$; $\lambda_0 = 1.5 \text{ мкм}$ [A8].

Влияние потерь на оптимальное сжатие сильнее для более длинных импульсов. Они имеют меньшую пиковую мощность по сравнению с более короткими солитонами, следовательно, для них значительный набег нелиней-

ной фазы r_{Kerr} накапливается при большей длине волокна. Поэтому для достижения оптимального сжатия требуемая длина волокна должна быть больше, и влияние потерь оказывается сильнее. При включении рамановских эффектов резко ухудшается сжатие 0.2-пс импульсов, а сжатие более длинных импульсов изменяется слабо (рисунок 2, нижний ряд). Это является следствием меньшего перекрытия более узкого спектра более длинных импульсов со спектром функции рамановского отклика [A8]. Для 0.2-пс солитонов рамановские эффекты преобладают над потерями, поэтому кривые сжатия с потерями и без них практически совпадают. Напротив, результаты для импульсов длительностью 0.5 пс и 1 пс, полученные с учетом рамановских эффектов, очень похожи на результаты, полученные без них [A8]. Оптимальные длины составляют <10 м для солитонов длительностью 0.2 пс, и несколько десятков метров для солитонов длительностью 0.5 пс и >100 м для 1-пс солитонов. Промежуточные длительности предпочтительнее для достижения наибольшего сжатия (сильнее -20 дБ), так как для них соблюдается баланс между ограничивающими факторами. Наиболее сильное сжатие -22 дБ достигается для солитонов длительностью 0.4 пс с энергией 2.7 нДж при $L = 23$ м [A8].

Далее выполнено детальное численное моделирование и оптимизация поляризационного сжатия шумов импульсов солитонной формы, параметры которых не соответствуют фундаментальному солитону (рисунок 2) [A1].

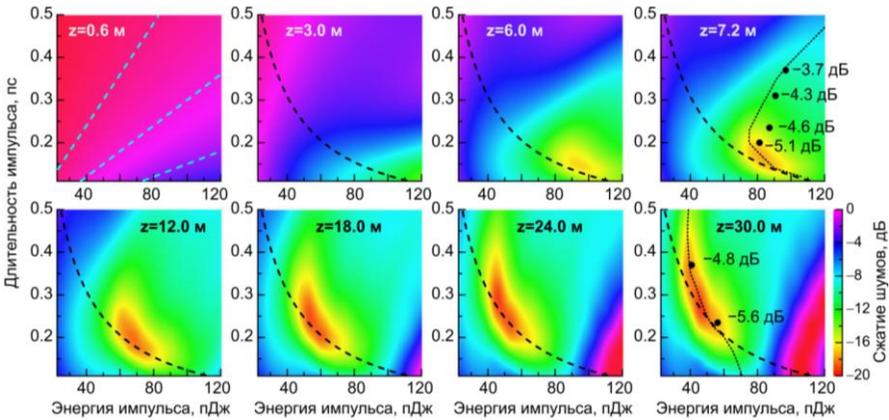


Рисунок 3. Результаты численного моделирования сжатия квантовых шумов импульсов при различных длинах кварцевых волокон z в зависимости от двух переменных: энергии и длительности импульса без учета потерь. Штриховые линии на графике для $z = 0.6$ м соответствуют постоянной пиковой мощности. Штриховые черные линии на остальных графиках соответствуют параметрам фундаментального солитона. Пунктирные линии на графиках для $z = 7.2$ м и $z = 30$ м соответствуют максимальному сжатию при заданной длительности импульса. Черные точки показывают результаты измерений, полученные при оптимизации энергии импульса в эксперименте. Рядом с каждой точкой приведены измеренные значения сжатия. Параметры, используемые в моделировании: $\beta_2 = -10.5$ пс²/км; $\beta_3 = 0.155$; $\gamma = 3$ (Вт·км)⁻¹; $\alpha = 0$; $\lambda_0 = 1.56$ мкм [A1].

На основе анализа трехмерного массива данных, полученного при моделировании динамики импульсов, определены области параметров для наилучшего сжатия и описаны общие тенденции, охватывающие широкий диапазон параметров импульсов и волокна (рисунок 3). Показано, что наилучшее сжатие достигается для импульсов с энергией на 10-20% превышающей энергию для фундаментального солитона [A1]. Предложено простое аналитическое приближение, учитывающее действие рамановской нелинейности и обеспечивающее оптимальную длительность импульса для заданных параметров волокна. Результаты теоретического анализа качественно согласуются с экспериментальными измерениями соавторов [A1].

Глава 2 посвящена сжатию квантовых флуктуаций непрерывных лазерных сигналов в специальных волокнах из теллуридных и халькогенидных стекол с высокой керровской нелинейностью и широкой полосой прозрачности [A4, A7, A9, A10]. Предложено использовать эти волокна для создания источников сжатого света в диапазоне длин волн около 2 мкм, что представляет огромный практический интерес. В настоящее время с точки зрения квантовой волоконной оптики относительно освоен спектральный диапазон около 1.5 мкм, но за его пределами волоконных источников неклассического света на данный момент нет. Это обусловлено высокими потерями стандартных кварцевых волокон. Так, на длине волны 2 мкм они составляют 20-50 дБ/км. В работе рассматриваются волокна из трех типов специальных стекол (на основе TeO_2 , As_2S_3 и As_2Se_3) с сопоставимыми потерями на 2 мкм, но с γ на 2-3 порядка выше, чем для стандартных волокон. Благодаря этому длины волокон для получения эквивалентного набегу нелинейной фазы $r_{\text{кэф}} = \gamma PL$ значительно сокращаются, и общее влияние потерь значительно снижается.

В начале главы для специальных волокон с различными диаметрами сердцевин и числовыми апертурами осуществляется расчет параметров γ и β_2 , которые затем используются при моделировании сжатия квантовых шумов непрерывных сигналов. Отметим, что для рассмотренных волокон $\beta_2 > 0$, поэтому при распространении в них непрерывных сигналов не развивается модуляционная неустойчивость. Прежде чем проводить детальные ресурсоемкие исследования в рамках полной численной модели с учетом особенностей волокон разного типа, были произведены оценки с использованием аналитических формул (3) и (4), позволяющих учесть сжатие шумов непрерывных сигналов с учетом потерь, «сконцентрированных» на выходе волокна без учета рамановских эффектов. Было показано, что оценочное сжатие сильнее -10 дБ можно ожидать при $\gamma Pz > 3$ и потерях $\kappa < 0.4$ дБ.

Было выполнено детальное численное моделирование сжатия квантовых шумов непрерывных лазерных сигналов в волокнах с реалистичными параметрами в рамках модели, изложенной в первой главе. Результаты представлены на рисунке 4 (каждый ряд соответствует определенному волокну) [A4].

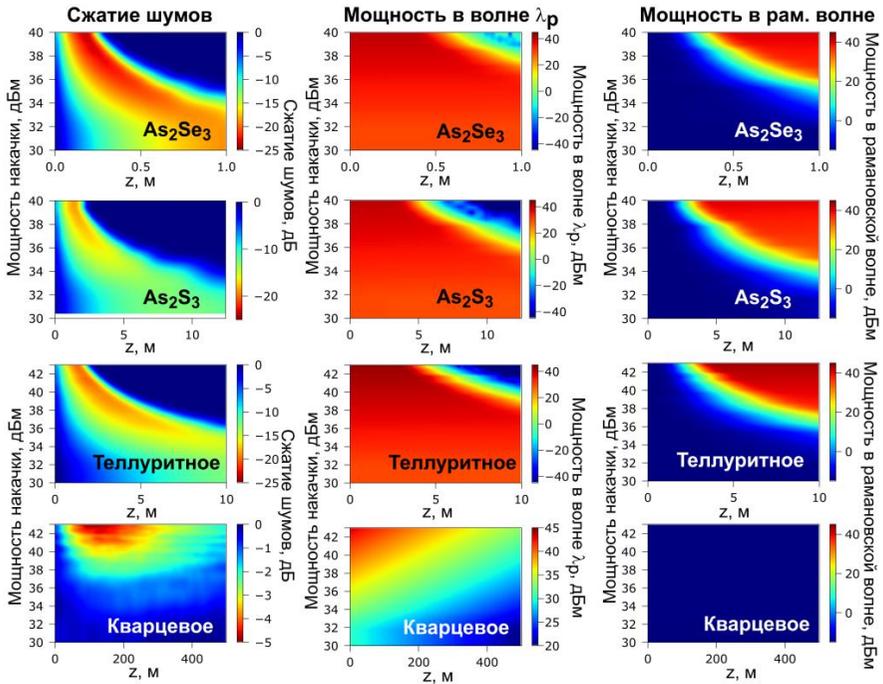


Рисунок 4. Результаты численного моделирования сжатия квантовых шумов (левый столбец); мощности в лазерном сигнале на длине волны накачки $\lambda_p = 2$ мкм (средний столбец) и мощности в рамановской (ВКР) волне (правый столбец) в зависимости от длины волокна и от мощности накачки для волокон из различных стекол. Верхний ряд – волокно из халькогенидного As_2Se_3 стекла ($\gamma = 5000$ (Вт км)⁻¹, $\alpha = 60$ дБ/км), второй ряд – из халькогенидного As_2S_3 стекла ($\gamma = 400$ (Вт км)⁻¹, $\alpha = 50$ дБ/км), третий ряд – из теллуридного стекла ($\gamma = 200$ Вт км)⁻¹, $\alpha = 20$ дБ/км), нижний ряд – стандартное кварцевое волокно SMF28e ($\gamma = 0.6$ Вт км)⁻¹, $\alpha = 20$ дБ/км) [A4].

Сжатие флуктуаций в зависимости от z и P показано в левой колонке. Чем выше мощность накачки, тем сильнее оптимальное сжатие. Однако сжатие не является монотонной функцией z ; существуют оптимальные длины, при которых оно наиболее сильное. При этом минимум достаточно широкий, а сжатие вблизи оптимальных значений достигается в достаточно широком диапазоне z при фиксированной мощности P . Кроме того, чем выше P , тем короче оптимальная длина волокна. Для объяснения этих особенностей были рассчитаны выходные мощности на длине волны накачки λ_p , а также в рамановской волне в зависимости от двух параметров – z и P (средний и правый столбцы на рисунке 4 соответственно). При относительно высоких мощностях накачки (>36 дБм) и длинах, больше оптимальных, детерминированная рамановская нелинейность играет существенную роль для специальных волокон. Наблюдается значительная перекачка энергии от волны, соответствующей накачке

λ_p , в рамановскую волну (мощности на длине волны λ_p резко уменьшаются, а мощности в рамановских волнах резко увеличиваются к правому углу на соответствующих рисунках). При относительно малых мощностях накачки (<33 дБм) рамановская нелинейность не очень важна; основным ограничивающим фактором являются оптические потери. Это было проверено дополнительным численным моделированием, в котором последовательно отключались рамановские эффекты и потери, а результаты сравнивались с результатами, полученными в полной модели [A4]. Для кварцевых волокон потери являются основным ограничивающим фактором для всех рассматриваемых значений мощности. Таким образом, рисунок 4 демонстрирует, что теоретическое сжатие квантового шума сильнее –20 дБ ожидается для волокон из As_2Se_3 стекла при их длинах менее 1 м. Для волокон из As_2S_3 и теллуритного стекла сжатие в диапазоне –20...–15 дБ может быть достигнуто при длинах волокон порядка 1 м. Стандартные кварцевые волокна не подходят для сильного сжатия квантовых флуктуаций на длине волны 2 мкм, так как при требуемых длинах >100 м оптические потери резко ухудшают сжатое состояние [A4].

Также исследована генерация неклассических состояний непрерывного лазерного излучения 10-Вт класса мощности в диапазоне длин волн около 1.55 мкм в волокнах из теллуритных стекол [A7, A9, A10]. Показана возможность достижения немного большей степени сжатия света, чем в двухмикронном диапазоне, при использовании одного и того же волокна и излучения той же мощности, поскольку нелинейный керровский коэффициент обратно пропорционален длине волны, и его значение выше для длин волн 1.55 мкм, чем для 2 мкм (а потери практически одинаковые на этих длинах волн).

В главе 3 исследуются новые возможности метода восстановления формы и фазы ультракоротких импульсов на основе измерений исходного спектра и двух спектров, полученных при преобразовании импульса за счет фазовой самомодуляции (ФСМ) в волокне с керровской нелинейностью для двух различных значений B -интегралов [A5, A6, A11, A12]. Метод был предложен в [12], и для нахождения спектральной фазы использовался итерационный алгоритм на основе алгоритма Гершберга-Сакстона. Производится минимизация функция ошибки Δ , характеризующей разницу между ФСМ-спектрами: экспериментально измеренными и построенными для найденной фазы (чем меньше Δ , тем ближе найденная фаза к настоящей). Но алгоритм корректно работает, если изменение фазы на характерном масштабе сигнала не превышает π [12,13]. Для большого чирпа при минимизации Δ возникает проблема, связанная с тем, что может находиться «ошибочное» решение вблизи локального минимума Δ , а не вблизи требуемого глобального минимума.

Для нахождения глобального минимума функции ошибок и преодоления проблемы, связанной с нахождением «ошибочного» решения вблизи локального минимума Δ , автором предложен новый простой и быстрый алгоритм, основанный на аппроксимации спектральной фазы полиномиальной функци-

ей и оптимизации ее коэффициентов методом полного перебора на разумной сетке таким образом, чтобы минимизировать ошибку [A5]. Рассмотрена аппроксимация с учетом квадратичного и кубического вкладов, что является наиболее важным с практической точки зрения случаем. Кроме того, данный случай допускает простую и наглядную графическую интерпретацию, позволяющую визуально контролировать нахождение решения.

Вначале был рассмотрен «идеальный» случай. Исходный импульс со спектральной шириной 0.6 ТГц (FWHM) задавался без шумов со спектральной фазой $\varphi(f) = C_2^{(0)}f^2 + C_3^{(0)}f^3$; здесь $C_2^{(0)} = 6.5 \text{ пс}^2$, $C_3^{(0)} = -3.6 \text{ пс}^3$. Решение находилось с помощью предложенного алгоритма оптимизации полиномиальной спектральной фазы. Был выполнен полный перебор по области параметров $-10 \text{ пс}^2 \leq C_2 \leq 10 \text{ пс}^2$, $-10 \text{ пс}^3 \leq C_3 \leq 10 \text{ пс}^3$, в которой помимо глобального минимума, отвечающего «правильному» решению, также обнаружен локальный минимум. На рисунках 5(а-г) показано численно найденное решение [A5]. Для такого случая параметры восстановленного импульса идеально совпали с исходными. На рисунке 5 (д) показана рассчитанная функция ошибок, где глобальный минимум обозначен «I», а локальный минимум обозначен «II». Для сравнения был специально построен импульс с фазой, отвечающей локальному минимуму II. Для него ошибка $\Delta = 0.0199$ значительно выше, чем для импульса, соответствующего глобальному минимуму I ($\Delta = 2.8 \cdot 10^{-17}$). В ФСМ-спектрах, построенных для исходного импульса и для «ошибочно» восстановленного (рисунки 5(е-и)), наблюдаются значительные отличия.

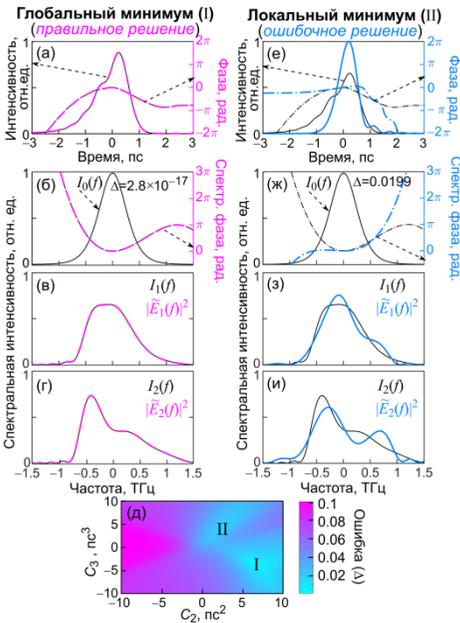


Рисунок 5. Демонстрация применения предложенного алгоритма оптимизации полиномиальной спектральной фазы для «идеального» случая. (а-г, левый столбец) «Правильное» решение, построенное для глобального минимума I функции ошибок Δ ($C_2 = 6.5 \text{ пс}^2$, $C_3 = -3.6 \text{ пс}^3$), показанной на (д). (е-и, правый столбец) «Ошибочное» решение, построенное для локального минимума II функции ошибок Δ ($C_2 = 2.2 \text{ пс}^2$ и $C_3 = 4 \text{ пс}^3$), показанной на (д). (а, е) Интенсивность и фаза во временной области; (б, ж) спектр входного импульса и спектральная фаза; (в, з) преобразованные спектры при $B_1 = 1$; (г, и) преобразованные спектры при $B_2 = 2$. Черные кривые рассчитаны для начального импульса, розовые и голубые кривые соответствуют численно восстановленным импульсам [A5].

Далее исследовалось влияние спектрального шума на результаты выполнения алгоритма. На большом количестве тестовых примеров ($\sim 10^2$), сгенерированных для спектральных фаз со случайными значениями коэффициентов $C_2^{(0)}$ и $C_3^{(0)}$, была проверено, что находится решение, соответствующее оригинальному сигналу вблизи глобального минимума, и алгоритм устойчив к спектральным шумам [A5].

Также предложено и исследовано применение гибридного алгоритма для восстановления импульса, что особенно оправдано в случаях, когда фаза сильно отличается от полиномиальной. Сначала выполнялся предложенный алгоритм оптимизации полиномиальной спектральной фазы, а затем выполнялся итерационный алгоритм, использующий в качестве начального условия найденную полиномиальную фазу, соответствующую глобальному минимуму Δ . Показано, что гибридный алгоритм находит «правильное» решение [A5].

Предложенный алгоритм успешно применен для обработки экспериментальных данных с использованием кварцевых и As_2S_3 волокон в качестве нелинейных элементов; результаты подтверждены независимыми измерениями методом оптического стробирования со спектральным разрешением (FROG). Результаты обработки данных при использовании As_2S_3 волокна ($L = 1.5$ см, $\gamma \approx 300(\text{Вт} \cdot \text{км})^{-1}$) для измерения 160-фс импульсов показаны на рисунке 6 [A6].

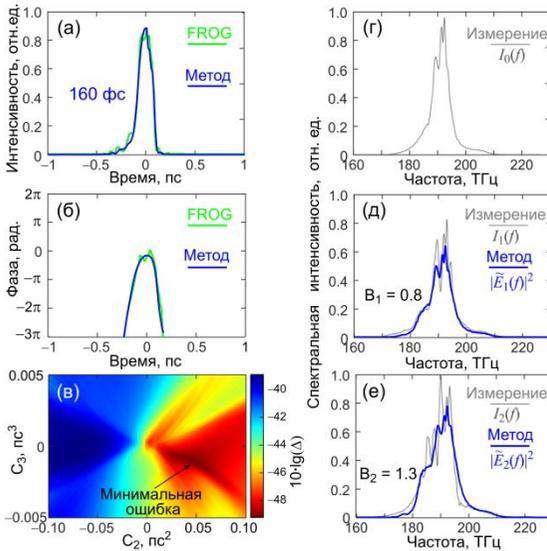


Рисунок 6. Восстановление импульса с помощью предложенного алгоритма оптимизации полиномиальной спектральной фазы по экспериментальным измерениям с использованием As_2S_3 волокна в качестве нелинейного элемента. Временное распределение интенсивности (а) и временная фаза (б), найденные с использованием тестируемого метода и независимо с помощью FROG. (в) Расчетная функция ошибок. (г) Измеренный фундаментальный спектр. Измеренные и восстановленные ФСМ-спектры при $B_1 = 0.8$ (д) и $B_2 = 1.3$ (е) [A6].

Далее в работе автором предложена и исследована возможность реализации представленного метода для восстановления импульсов в диапазоне длин волн около 3 мкм с применением в качестве элементов с керровской нелинейностью волокон из теллуридных и халькогенидных As_2S_3 стекол, прозрачных в среднем ИК диапазоне. А именно, предложена и численно продемонстрирована

рирована модификация метода для измерения ультракоротких импульсов, усиливаемых в легированном эрбием теллуридном волокне на длине волны 2.8 мкм [A11,A12], без использования дополнительных оптических элементов [A12]. В случае As_2S_3 волокон на различных репрезентативных примерах, используя реалистичные параметры ультракоротких импульсов и этих нелинейных волокон, численно продемонстрировано, что предложенный алгоритм поиска спектральной полиномиальной фазы дает достаточно хорошее совпадение восстановленных параметров импульсов с исходными, а последующее применение итерационного алгоритма вблизи глобального минимума функции ошибок позволяет добиться почти идеального соответствия между оригинальными и восстановленными импульсами [A5].

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем.

1. Теоретически исследованы возможности поляризационного керровского сжатия квантовых флуктуаций ультракоротких импульсов в кварцевых волокнах в диапазоне длин волн около 1.5 мкм. Определены оптимальные длины волокон и параметры импульсов (длительность, энергия) для достижения наилучшего сжатия и подавления паразитных эффектов. Результаты качественно согласуются с экспериментальными измерениями. Показано, что при длительности солитонов ≥ 0.5 пс оптические потери в волокне ограничивают сжатие, а рамановские эффекты незначительны, в то время как при длительностях ≤ 0.2 пс сжатие ограничивается рамановскими эффектами. Обнаружено, что существует оптимальная длительность солитонов (~ 0.4 пс), обеспечивающая наиболее сильное сжатие (-22 дБ без учета потерь в схеме детектирования), при достижении баланса между ограничивающими факторами.
2. Предложена и детально теоретически исследована генерация неклассических состояний непрерывного лазерного излучения 10-Вт класса мощности в двухмикронном диапазоне длин волн с теоретически достижимым сжатием квантовых флуктуаций сильнее -10 дБ в теллуридных и халькогенидных волокнах с нелинейными керровскими коэффициентами на 2-4 порядка выше, чем у стандартных кварцевых волокон. Выявлены факторы, ограничивающие сжатие шумов. При относительно высоких мощностях накачки (>36 дБм) и длинах, больше оптимальных, детерминированная рамановская нелинейность играет существенную роль. При относительно малых мощностях накачки (<33 дБм) рамановская нелинейность не очень важна; основным ограничивающим фактором являются оптические потери в волокне. Численно продемонстрировано предельное керровское квантовое сжатие сильнее -20 дБ для

специального волокна из As_2Se_3 стекла и в диапазоне $-20\dots-15$ дБ для коммерческих волокон из As_2S_3 стекла и специальных теллуритных волокон (без учета потерь в схеме детектирования). Показано, что при использовании теллуритных волокон такой же уровень квантового сжатия достижим и в диапазоне длин волн около 1.5 мкм.

3. Предложен и детально исследован новый эффективный компьютерный алгоритм обработки экспериментальных данных в неинтерферометрическом методе измерения фазы ультракоротких импульсов, основанном на измерении исходного спектра оптического сигнала и двух спектров, преобразованных в волокнах с керровской нелинейностью. Предложенный алгоритм, позволяющий расширить область применения разработанных до этого алгоритмов, основан на аппроксимации спектральной фазы полиномиальной функцией и оптимизации ее коэффициентов при глобальной минимизации функции ошибок. С помощью предложенного алгоритма произведена обработка экспериментально измеренных данных, позволившая восстановить 160-фс импульсы при использовании халькогенидного As_2S_3 волокна и 670-фс одиночные импульсы при использовании кварцевого волокна. Эти результаты были экспериментально верифицированы с помощью независимого метода оптического стробирования со спектральным разрешением.

4. Предложено и теоретически исследовано восстановление фазы ультракоротких импульсов длительностью от нескольких сотен фс до нескольких десятков пс в трехмикронном диапазоне длин волн на основе преобразования спектров в прозрачных в данном диапазоне теллуритных и халькогенидных волокнах с применением различных алгоритмов: предложенного алгоритма оптимизации полиномиальной фазы, итерационного алгоритма типа Гершберга-Сакстона и гибридного алгоритма.

Таким образом, полученные в диссертационной работе результаты создают основу для реализации новых волоконных источников неклассического света со сжатыми квантовыми флуктуациями значительно ниже стандартного квантового предела для одной из квадратурных компонент сигнала, что востребовано для многих современных приложений. Также результаты работы перспективны для использования в задачах ультрабыстрой метрологии, в том числе, в мало освоенном среднем инфракрасном диапазоне. Дальнейшая разработка темы может быть связана с экспериментальной реализацией и поиском новых материалов с высокой керровской нелинейностью и низкими оптическими потерями и оптимизацией на их основе волоконных систем для формирования квантового сжатого света в различных спектральных областях.

Список литературы

1. Agrawal, G.P. *Nonlinear Fiber Optics*, 6th ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019.

2. Chang, G. Ultrafast fiber lasers: an expanding versatile toolbox / G. Chang, Z. Wei // *Iscience*. – 2020. – Vol.23, №.5. – P. 101101.
3. Sizmann, A. V The optical kerr effect and quantum optics in fibers / A. Sizmann, G. Leuchs // *Progress in optics*. – 1999. – Vol. 39. – P. 373-469.
4. Wang, W. C. Recent advances in soft optical glass fiber and fiber lasers. / W. C. Wang, B. Zhou, S. H. Xu, Z. M. Yang, Q. Y. Zhang // *Progress in Materials Science*. – 2019. – Vol. 101. – P. 90-171.
5. Tao, G. Infrared Fibers / G. Tao, H. Ebendorff-Heidepriem, A.M. Stolyarov, S. Danto, J.V. Badding, Y. Fink, J. Ballato, A.F. Abouraddy // *Advances in Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 7, №.2. – P. 379-458.
6. Wang, Y. Mid-infrared supercontinuum generation in chalcogenide glass fibers: a brief review / Y. Wang, S. Dai // *Photonix*. – 2021. – Vol. 2. – P. 9.
7. Huang, P. Integrated Reconfigurable Photon-Pair Source Based on High-Q Nonlinear Chalcogenide Glass Microring Resonators / P. Huang, B. Chen, D. Xia, Z. Li, B. Zhang, Z. Liu, D. Wei, Z. Li, J. Liu // *Nano Letters*. – 2023 – Vol.23.
8. Andersen, U.L. 30 years of squeezed light generation. / U.L. Andersen, T. Gehring, C. Marquardt, G. Leuchs. // *Physica Scripta*. – 2016. – Vol. 91, №5. – P. 053001.
9. Lawrie B. J. Quantum Sensing with Squeezed Light / B. J. Lawrie, P. D. Lett, A. M. Marino, R. C. Pooser. // *ACS Photonics* – 2019 – Vol. 6, №6. – P. 1307–1318.
10. Drummond, P. D. Quantum noise in optical fibers. I. Stochastic equations / P. D. Drummond, J. F. Corney // *JOSA B*. – 2001. – Vol. 18, №2. – P. 139–152.
11. [D59]Bachor, H.A.; Ralph, T.C.; Lucia, S.; Ralph, T.C. *A Guide to Experiments in Quantum Optics*; Wiley-vch: Weinheim, Germany, 2004.
12. Anashkina, E.A. Single-shot laser pulse reconstruction based on self-phase modulated spectra measurements / E.A. Anashkina, V.N. Ginzburg, A.A. Kochetkov, I.V. Yakovlev, A.V. Kim, E.A. Khazanov // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 33749.
13. Anashkina, E.A. Complete Field Characterization of Ultrashort Pulses in Fiber Photonics. *IEEE J. Select. Topics* / E.A. Anashkina, A.V. Andrianov, M.Yu. Koptev, A.V. Kim // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2017. – Vol. 24, №3. – P. 8700107.

Список статей автора по теме диссертационного исследования

- A1. Andrianov, A.V. Optimizing the generation of polarization squeezed light in nonlinear optical fibers driven by femtosecond pulses / A.V. Andrianov, N.A. Kalinin, **A.A. Sorokin**, E.A. Anashkina, L.L. Sanchez-Soto, J.F. Corney, G. Leuchs // *Optics Express* – 2023 – Vol. 31, №1. – P. 765-773.

- A2. Андрианов А.В. Волоконно-оптические источники квантового сжатого света / А.В. Андрианов, Н.А. Калинин, **А.А. Сорokin**, Е.А. Анашкина, Г. Лойхс // *Автометрия* – 2023 – Т. 59, №1. – С. 34-45.
- A3. Kalinin, N. Quantum-enhanced interferometer using Kerr squeezing / N. Kalinin, T. Dirmeier, **A.A. Sorokin**, E.A. Anashkina, L.L. Sánchez-Soto, J.F. Corney, G. Leuchs, A.V. Andrianov // *Nanophotonics* – 2023 – Vol. 12.
- A4. **Sorokin A. A.** Towards quantum noise squeezing for 2-micron light with tellurite and chalcogenide fibers with large Kerr nonlinearity / A.A. Sorokin, G. Leuchs, J.F. Corney, N.A. Kalinin, E.A. Anashkina, A.V. Andrianov // *Mathematics* – 2022 – Vol.10, №19. – P. 3477
- A5. **Sorokin A. A.** Numerical study of mid-IR ultrashort pulse reconstruction based on processing of spectra converted in chalcogenide fibers with high Kerr nonlinearity / **A.A. Sorokin**, A.V. Andrianov, E.A. Anashkina // *Fibers* – 2022 – Vol.10, №10. – P. 81.
- A6. Anashkina E.A. Ultrashort Pulse Retrieval from Experimental Spectra Transformed in Chalcogenide and Silica Fibers / E.A. Anashkina, **A.A. Sorokin**, A.V. Andrianov // *Fibers* – 2022 – Vol.10, №11 – P. 98.
- A7. **Sorokin A. A.** Formation of Non-Classical Multiphoton States of Light with Squeezed Quantum Fluctuations in Bismuth-Modified Tellurite Glass Fibers / A. A. Sorokin, V. V. Dorofeev, S. E. Motorin, I. Lyashuk, J. Porins, G. Leuchs, V. Bobrovs // *Optics and Spectroscopy* – 2022 – Vol.130, №2. – P. 102–107.
- A8. **Sorokin A. A.** Numerical Simulations on Polarization Quantum Noise Squeezing for Ultrashort Solitons in Optical Fiber with Enlarged Mode Field Area / A.A. Sorokin, E.A. Anashkina, J.F. Corney, V. Bobrovs, G. Leuchs, A.V. Andrianov // *Photonics* – 2021 – Vol.8, №6 – P. 226.
- A9. **Sorokin A. A.** Quantum Noise Squeezing for Optical Signals in Zinc-Tellurite Fibers / A.A. Sorokin, V.V. Dorofeev, S.E. Motorin, G. Leuchs // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* – 2021 – Vol.48, №12. – P. 390–394.
- A10. Anashkina E.A. Quantum noise squeezing of CW light in tellurite glass fibres / E. A. Anashkina, **A. A. Sorokin**, G. Leuchs, A. V. Andrianov // *Results in Physics* – 2021 – Vol. 30. – 104843
- A11. Anashkina E.A. Two-color pump schemes for Er-doped tellurite fiber lasers and amplifiers at 2.7–2.8 μm / E.A. Anashkina, A.V. Andrianov, V.V. Dorofeev, S.V. Muravyev, M.Y. Koptev, **A.A. Sorokin**, S.E. Motorin, V.V. Koltashev, B.I. Galagan, B.I. Denker // *Laser Physics Letters* – 2019 – Vol.16, №2. – P. 025107.
- A12. Anashkina E.A. Possibilities of laser amplification and measurement of the field structure of ultrashort pulses in the range of 2.7 –3 μm in tellurite glass fibres doped with erbium ions / E.A. Anashkina, V.V. Dorofeev, S.V. Muravyev, S.E. Motorin, A.V. Andrianov, **A.A. Sorokin**, M.Yu. Koptev, S. Singh, A.V. Kim // *Quantum Electronics* – 2018 – Vol.48, №12. – P. 1118 –1127.

Сорокин Арсений Андреевич

**ФОРМИРОВАНИЕ СЖАТЫХ СОСТОЯНИЙ СВЕТА
И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ФАЗЫ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ
С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОЛОКОН
С ВЫСОКОЙ КЕРРОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 26.09.2023. Формат 60x90 $\frac{1}{16}$
Бумага офсетная №1. Тираж 100 экз. Заказ №41

Отпечатано в типографии ИП Сеницын А.Е.
603155 г. Нижний Новгород, ул. Провиантская, 8.