



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПФ РАН
академик РАН Г.Г. Денисов

«10» июля 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

по диссертации Сорокина Арсения Андреевича
«Формирование сжатых состояний света и характеристика фазы оптических импульсов с помощью специальных волокон с высокой керровской нелинейностью»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.19. Лазерная физика

Работа выполнена в отделе сверхбыстрых процессов (330) ИПФ РАН

Научный руководитель – Анашкина Елена Александровна, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

В 2020 г. соискатель ученой степени окончил магистратуру/специалитет
ННГУ им. Н.И. Лобачевского по направлению подготовки/ специальности физика.
В период с 01.09.2020 г. по 31.08.2023 г. обучался в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Свидетельство об окончании аспирантуры № 105200 00000001 от 10 июля 2023 года.

В период подготовки диссертации соискатель Сорокин Арсений Андреевич работал в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» в отделе сверхбыстрых процессов (330) в должности младшего научного сотрудника.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД

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. Калининным.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оптические волокна широко используются для различных приложений и развития квантовых технологий. 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. Подходящими материалами являются специальные теллуритные и халькогенидные стекла с нелинейным показателем преломления на 1-3 порядка выше, чем для кварцевого стекла. Кроме того, длинноволновые границы прозрачности для этих специальных стекол расположены в среднем ИК диапазоне (в то время как кварцевые стекла практически непрозрачны при длинах волн >2.3 мкм), что позволяет исследовать нелинейные и квантовые эффекты в теллуритных и халькогенидных волокнах в спектральном диапазоне за пределами полосы прозрачности стандартных кварцевых световодов. Значительная часть диссертационного исследования находится на стыке направлений квантовой оптики и нелинейной волоконной оптики с использованием как кварцевых, так и специальных теллуритных и халькогенидных волокон, и относится к актуальному направлению развития современной фотоники и квантовых технологий.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Впервые в рамках математической модели, реалистично описывающей эволюцию лазерных сигналов в специальных кварцевых оптических волокнах, детально исследовано влияние различных факторов и параметров системы 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. 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 впервые детально 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 теллуритных и халькогенидных волокнах. Выявлены факторы, ограничивающие сжатие шумов. При относительно высоких мощностях накачки (>36 дБм) и длинах, больше оптимальных, 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 получено

предельное керровское квантовое сжатие сильнее -20 дБ для волокна из As_2Se_3 стекла и в диапазоне $-20\dots-15$ дБ для волокон из As_2S_3 и 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 впервые 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.

СТЕПЕНЬ ДОСТОВЕРНОСТИ НАУЧНЫХ 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.

ПРАКТИЧЕСКАЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ 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.

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, что востребовано для квантового зондирования, прецизионной квантовой метрологии, а также для получения 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, 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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. A.V. Andrianov, N.A. Kalinin, **A.A. Sorokin**, E.A. Anashkina, L.L. Sanchez-Soto, J.F. Corney, G. Leuchs. Optimizing the generation of polarization squeezed light in nonlinear optical fibers driven by femtosecond pulses. *Optics Express* – 2023 – Vol. 31, №1. – P. 765-773.
2. А.В. Андрианов, Н.А. Калинин, **А.А. Сорокин**, Е.А. Анашкина, Г. Лойхс. Волоконно-оптические источники квантового сжатого света. *Автоматрия* – 2023 – Т. 59, №1. – С. 34-45.
3. N. Kalinin, T. Dirmeier, **A.A. Sorokin**, E.A. Anashkina, L.L. Sánchez-Soto, J.F. Corney, G. Leuchs, A.V. Andrianov. Quantum-enhanced interferometer using Kerr squeezing. *Nanophotonics* – 2023 – Vol. 12.
4. **A.A. Sorokin**, G. Leuchs, J.F. Corney, N.A. Kalinin, E.A. Anashkina, A.V. Andrianov. Towards quantum noise squeezing for 2-micron light with tellurite and chalcogenide fibers with large Kerr nonlinearity. *Mathematics* – 2022 – Vol.10, №19. – P. 3477
5. **A.A. Sorokin**, A.V. Andrianov, E.A. Anashkina. Numerical study of mid-IR ultrashort pulse reconstruction based on processing of spectra converted in chalcogenide fibers with high Kerr nonlinearity. *Fibers* – 2022 – Vol.10, №10. – P. 81.
6. E.A. Anashkina, **A.A. Sorokin**, A.V. Andrianov. Ultrashort Pulse Retrieval from Experimental Spectra Transformed in Chalcogenide and Silica Fibers. *Fibers* – 2022 – Vol.10, №11 – P. 98.
7. **A. A. Sorokin**, V. V. Dorofeev, S. E. Motorin, I. Lyashuk, J. Porins, G. Leuchs, V. Bobrovs. Formation of Non-Classical Multiphoton States of Light with Squeezed Quantum Fluctuations in Bismuth-Modified Tellurite Glass Fibers. *Optics and Spectroscopy* – 2022 – Vol.130, №2. – P. 102–107.
8. **A.A. Sorokin**, E.A. Anashkina, J.F. Corney, V. Bobrovs, G. Leuchs, A.V. Andrianov. Numerical Simulations on Polarization Quantum Noise Squeezing for Ultrashort Solitons in Optical Fiber with Enlarged Mode Field Area. *Photonics* – 2021 – Vol.8, №6 – P. 226.
9. **A.A. Sorokin**, V.V. Dorofeev, S.E. Motorin, G. Leuchs. Quantum Noise Squeezing for Optical Signals in Zinc-Tellurite Fibers. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* – 2021 – Vol.48, №12. – P. 390–394.
10. E. A. Anashkina, **A. A. Sorokin**, G. Leuchs, A. V. Andrianov. Quantum noise squeezing of CW light in tellurite glass fibres. *Results in Physics* – 2021 – Vol. 30. – 104843

11. 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. Two-color pump schemes for Er-doped tellurite fiber lasers and amplifiers at 2.7–2.8 μm . Laser Physics Letters – 2019 – Vol.16, №2. – P. 025107.
12. 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. 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. Quantum Electronics – 2018 – Vol.48, №12. – P. 1118 – 1127.

Материалы диссертации аспиранта достаточно полно изложены в его публикациях. Статьи [1,2,3,8] составляют основу главы 1, статьи [4,7,9,10] – основу главы 2 и статьи [5,6,11,12] – основу главы 3. Работы соискателя представляют ценность как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения. Они важны для развития нелинейной и квантовой волоконной оптики, квантовых технологий и для развития систем измерения ультракоротких импульсов в широком спектральном диапазоне.

Ссылки на источники заимствования материалов или отдельных результатов, в том числе работы, выполненные аспирантом в соавторстве, оформлены корректно.

Научная специальность, которой соответствует диссертация: 1.3.19. Лазерная физика

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**:

Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике".

Диссертация «Формирование сжатых состояний света и характеристика фазы оптических импульсов с помощью специальных волокон с высокой керровской нелинейностью» Сорокина Арсения Андреевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности:

1.3.19. Лазерная физика

Настоящее заключение составлено на основании решения Ученого совета отделения нелинейной динамики и оптики по проведению итоговой аттестации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности: 1.3.19. Лазерная физика

Присутствовало на заседании 15 чел.

Результаты голосования: «за» – 15 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

протокол № 5 от « 14 » июня 2023г.



Коржиманов Артем Владимирович,
кандидат физико-математических наук,
Учёный секретарь отделения нелинейной динамики и
оптики, зам.зав.отделом 330