

## ОТЗЫВ

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

Работа Сорокина А.А. посвящена теоретическому исследованию 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. Эта тематика, несомненно, является актуальной и представляет огромный интерес для развития современной фотоники и квантовых технологий.

Сорокин А.А. начал исследовательскую деятельность под моим руководством в 2016 году, являясь студентом 3 курса ННГУ им. Н.И. Лобачевского. В 2018 г. он блестяще защитил бакалаврскую дипломную работу, а в 2020 г. – магистерскую, затем поступил в аспирантуру ИПФ РАН, которую досрочно закончил в 2023 г. Изначально область его интересов касалась теоретического исследования классических нелинейно-оптических эффектов в оптических волокнах на основе специальных стекол, где, безусловно, им были достигнуты значительные успехи. Будучи студентом 6 курса, он занялся задачами квантовой оптики, при этом используя солидный задел, созданный им при решении классических задач. В аспирантуре Сорокин А.А. успешно работал как над классическими, так и квантовыми задачами, что отражено в его диссертации. 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.

Следует отметить, что в задачах квантовой волоконной оптики в большинстве случаев предполагается использование широко распространенных кварцевых волокон. Однако волокна на основе новых материалов, таких как высоконелинейные халькогенидные и теллуридные стекла, обладают огромным потенциалом для решения квантовых волоконно-оптических задач, включая формирование многофотонного квантового-сжатого света. В настоящее время практически отсутствуют работы других научных групп на эту тему. На мой взгляд, это связано с тем, что специалисты в области квантовой оптики зачастую не знают о достижениях в области специальных стекол, в то время как специалисты в области специальных стекол не знают о потенциальных квантовых приложениях и требованиях, накладываемых на разрабатываемые стекла и волокна на их основе. Поскольку Сорокин А.А. много внимания уделил исследованию классических нелинейно-оптических свойств специальных волокон в самом начале своей научной деятельности, то, начав работу над квантово-оптическими задачами, практически сразу предложил исследовать применимость специальных волокон для квантовых задач. И в этом направлении были достигнуты значительные успехи. Диссертационная работа Сорокина А.А. обладает значительной научной новизной и содержит оригинальные результаты, которые состоят в следующем:

1. Теоретически исследовано поляризационное керровское сжатие квантовых флуктуаций ультракоротких импульсов в кварцевых волокнах в спектральном диапазоне около 1.5 мкм. Определены оптимальные длины волокон и параметры импульсов для достижения наилучшего сжатия и подавления паразитных эффектов. Результаты качественно согласуются с экспериментальными измерениями соавторов. Показано, что при длительности солитонов  $\geq 0.5$  пс оптические потери в волокне ограничивают сжатие, а



рамановские эффекты незначительны, в то время как при длительностях  $\leq 0.2$  пс сжатие ограничивается рамановскими эффектами. Продemonстрировано, что существует оптимальная длительность солитонов ( $\sim 0.4$  пс), обеспечивающая наиболее сильное сжатие ( $-22$  дБ без учета потерь в схеме детектирования), при достижении баланса между ограничивающими факторами.

2. Предложена и детально исследована генерация непрерывного яркого сжатого света 10-Вт класса мощности в двухмикронном диапазоне длин волн с теоретически достижимым уровнем сжатия квантовых шумов сильнее  $-10$  дБ в теллуритных и халькогенидных волокнах с нелинейными керровскими коэффициентами на 2-4 порядка выше, чем у стандартных кварцевых волокон. Выявлены факторы, ограничивающие сжатие шумов. Показано, что 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.

Следует отметить, что теоретическое исследование генерации неклассических многофотонных состояний света с квантово-сжатыми флуктуациями в оптических волокнах за счет керровской нелинейности, безусловно, является очень сложной проблемой. Основной метод анализа основан на продвинутом математическом моделировании с учетом многих физических факторов, влияющих на процесс. В работе учитывались: фазовая самомодуляция из-за действия керровской нелинейности, вынужденное комбинационное рассеяние, оптические потери, дисперсия групповых скоростей, тепловые шумы и др. Кроме того, для корректной интерпретации результатов было необходимо применение аналитических методов и сравнение с предельными случаями, для которых могут быть построены адекватные модели.



При решении численных и аналитических задач возникает много трудностей, которые Сорокин А.А. успешно преодолел. Полученные численные и аналитические результаты хорошо согласуются между собой. Кроме того, для ряда теоретических результатов есть экспериментальная верификация, что, несомненно, повышает значимость работы. Результаты по этому направлению могут представлять особый интерес для развития сверхчувствительных систем детектирования.

В классической задаче измерения формы и фазы ультракоротких оптических импульсов с применением специальных волокон в качестве нелинейных элементов Сорокиным А.А. также достигнуты значительные успехи в разработке нового алгоритма оптимизации полиномиальной спектральной фазы. Это позволяет расширить область применения предложенного ранее итерационного алгоритма и может иметь огромное практическое значение для характеристики ультракоротких импульсов в различных современных приложениях.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 12 рецензируемых статьях, в том числе, в *Nanophotonics*, *Optics Express*, *Results in Physics* и др., а также лично представлены Сорокиным А.А. на российских и международных конференциях и семинарах.

Считаю, что диссертационная работа «Формирование сжатых состояний света и характеристика фазы оптических импульсов с помощью специальных волокон с высокой керровской нелинейностью» полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Сорокин Арсений Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Научный руководитель  
Старший научный сотрудник  
Доктор физико-математических наук

Анашкина Елена Александровна



12.09.2023

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)  
603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46  
Телефон (831) 418-90-46, адрес электронной почты [elena.anashkina@ipfran.ru](mailto:elena.anashkina@ipfran.ru)

Подпись Е.А. Анашкиной удостоверяю  
Заместитель директора по научной работе,  
доктор физико-математических наук



М.Ю. Глявин