

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Биленко Игоря Антоновича  
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

Диссертационная работа Сорокина А.А. посвящена теоретическому исследованию новых возможностей применения оптических волокон с высокой керровской нелинейностью в задачах квантовой и классической оптики, включая сжатие квантовых флуктуаций когерентного оптического излучения и характеристику фазы ультракоротких импульсов. Данное исследование относится к волоконной, квантовой и нелинейной оптике. Объектом исследования были как кварцевые, так и высоко нелинейные волокна на основе теллуридных и халькогенидных стекол с нелинейными показателями преломления на 1-3 порядка выше, чем для кварцевого стекла. Изучение новых материалов, свойства которых могут значительно отличаться от плавленого кварца, представляет огромную значимость и актуальность для волоконной оптики, поскольку нелинейные и квантовые эффекты в них проявляются при значительно меньших мощностях. Квантово-сжатый свет имеет принципиальное значение для разработки высокочувствительных датчиков и других приложений. Одной из важных проблем квантовой оптики является расширение доступного диапазона длин волн источников сжатого света. Изучение возможностей использования волокон для построения источников яркого квантово-сжатого света за пределами хорошо освоенного диапазона длин волн около 1.5 мкм является новым и весьма актуальным направлением. Исследование нового не интерферометрического метода характеристики фазы ультракоротких оптических импульсов с применением специальных волокон также является актуальной задачей. Такая характеристика особенно востребована в среднем ИК диапазоне, где применение стандартных (как правило, интерферометрических) методов сильно затруднено.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и списка статей автора по теме диссертационного исследования.

*Введение* содержит информацию об актуальности темы, целях и задачах исследования, научной новизне, теоретической и практической значимости работы, методологии и методах исследования, положениях, выносимых на защиту, степени достоверности и апробации результатов, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

*В первой главе* Сорокиным А.А. теоретически исследовано керровское сжатие квантовых флуктуаций ультракоротких оптических импульсов в кварцевых волокнах в диапазоне длин волн около 1.5 мкм. Определены оптимальные длины волокон и параметры импульсов для достижения наилучшего сжатия и подавления паразитных эффектов. 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 именно рамановскими эффектами. Найдена 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.

*Во второй главе* Сорокин А.А. предложил и детально исследовал генерацию неклассических состояний при воздействии непрерывного лазерного излучения в

двухмикронном диапазоне длин волн с теоретически достижимым сжатием квантовых флуктуаций более  $-10$  дБ в теллуритных и халькогенидных волокнах. Выявлены физические факторы, ограничивающие сжатие. Показано, что при относительно высоких мощностях накачки ( $>36$  дБм) и длинах, больше оптимальных, рамановская нелинейность играет существенную роль. Показано, что при относительно малых мощностях накачки ( $<33$  дБм) рамановская нелинейность не очень важна; основным ограничивающим фактором являются оптические потери в волокне.

В третьей главе Сорокин А.А. предложил и детально исследовал 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 автором 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 данного алгоритма произведена обработка экспериментально измеренных данных, полученных с применением халькогенидных и кварцевых волокон. Также соискатель предложил и теоретически исследовал восстановление фазы ультракоротких импульсов 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 применимость данного метода и различных алгоритмов обработки данных за пределами телекоммуникационного диапазона исследована впервые.

В заключении подведены итоги проведенного исследования, сформулированы основные результаты, а также рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Все представленные результаты диссертационного исследования являются достоверными и обоснованными, обладают научной новизной, научной и практической значимостью. 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.

Основные результаты диссертации Сорокина А.А. опубликованы в 12 рецензируемых статьях, удовлетворяющих требованиям ВАК, среди которых следует особенно отметить публикации в журналах *Nanophotonics*, *Results in Physics*, *Optics Express*. Результаты исследований неоднократно докладывались Сорокиным А.А. на российских и международных конференциях, школах и семинарах.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и дает адекватное представление о ней.

В работе присутствуют недостатки. В частности, на стр 18 указывается, что в модели учитывалась квадратичная дисперсия  $\beta_2$  и кубичная дисперсия  $\beta_3$ , однако в таблице параметров, использованных при моделировании сжатия шумов оптических солитонов на стр. 24  $\beta_3 = 0$ .

Дисперсия оказывает существенное влияние на распространение фемтосекундных импульсов, и, для халькогенидных волокон может заметно отличаться при различной технологии изготовления. К сожалению, в диссертационной работе экспериментальные данные по дисперсии для используемых волокон не приводятся, используются литературные данные.

Встречаются опечатки, иногда мешающие восприятию. На стр 39 написано: «Поскольку  $n_2$  для  $As_2Se_3$  стекла больше, чем для  $As_2Se_3$  волокон выше при тех же  $dn$  и диаметрах сердцевины».

Наконец, есть замечания к терминологии. В тексте неоднократно упоминаются «Рамановские эффекты», хотя, по сути, речь идёт об одном эффекте - комбинационном рассеянии света (эффект Рамана). Также, часто используется термин «специальные волокна», однако не поясняется в чём их отличие от не специальных из того же материала.

Указанные недостатки ни в коей мере не снижают общего, высокого уровня представленной работы и научной ценности полученных результатов.

#### Заключение

Диссертационная работа Сорокина Арсения Андреевича «Формирование сжатых состояний света и характеристика фазы оптических импульсов с помощью специальных волокон с высокой керровской нелинейностью» представляет собой завершённое научное исследование и удовлетворяет всем требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Сорокин Арсений Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

#### Официальный оппонент:

Биленко Игорь Антонович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, доцент, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет.

Адрес сайта: <https://phys.www.msu.ru/>

Телефон: +70161419953

E-mail: [igor.bilenko@physics.msu.ru](mailto:igor.bilenko@physics.msu.ru)

*Я, Биленко Игорь Антонович, выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.*

доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор МГУ им. М.В. Ломоносова

и.о. декана физического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор, д.ф.-м.н.



Биленко И.А.  
26.10.2023

Белокуров В.В.

**Список основных публикаций Биленко Игоря Антоновича по теме диссертации в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет (не более 15)**

1. Шитиков А.С., Волошин А.С., Горелов И.К., Лоншаков Е.А., Миньков К.Н., Дмитриев Н.Ю., Кондратьев Н.М., Лобанов В.Е., Биленко И.А., Генерация оптических частотных гребенок в оптическом микрорезонаторе на длине волны 780 нм в режиме затягивания при накачке лазерным диодом // Журнал экспериментальной и теоретической физики, том 161, № 5, с. 683-690 (2022)
2. Лебедев Н.М., Миньков К.Н., Шитиков А.Е., Данилин А.Н., Красивская М.И., Лоншаков Е.А., Горелов И.К., Дмитриев Н.Ю., Биленко И.А., Оптимизация изготовления одномодовых растянутых оптических волокон для когерентной микрооптики // Журнал технической физики, издательство Наука. С.-Петербург. Отд-ние (СПб.), том 92, № 6, с. 852-860 (2022)
3. Миньков К. Н., Данилин А. Н., Шитиков А. Е., Горелов И. К., Галкин М. Л., Мантузов А. В., Артемов Е. А., Красивская М. И., Лобанов В. Е., Биленко И. А., Метод химико-механической обработки поверхности высокодобротных кристаллических микрорезонаторов с модами типа шепчущей галереи // Оптический журнал, том 89, № 11, с. 76-83 (2022)
4. Tebeneva T. S., Shitikov A. E., Benderov O. V., Lobanov V. E., Bilenko I. A., Rodin A. V., Ultrahigh-Q WGM microspheres from ZBLAN for the mid-IR band // Optics Letters v. 47 6325-6328 (2022)
5. Balybin S.N., Matsko A.B., Khalili F.Ya, Strekalov D.V., Ilchenko V.S., Savchenkov A.A., Lebedev N.M., Bilenko I.A., Quantum nondemolition measurements of photon number in monolithic microcavities // Physical Review A v. 106, 013720 (2022)
6. Shitikov A. E., Lykov I. I., Benderov O. V., Chermoshentsev D. A., Gorelov I. K., Danilin A. N., Galiev R. R., Kondratiev N. M., Cordette S. J., Rodin A. V., Masalov A. V., Lobanov V. E., Bilenko I. A., Optimization of laser stabilization via self-injection locking to a whispering-gallery-mode microresonator: experimental study // Optics Express v. 31, 313 (2022)
7. Dmitriev N. Yu, Koptyaev S. N., Voloshin A. S., Kondratiev N. M., Min'kov K. N., Lobanov V. E., Ryabko M. V., Polonsky S. V., Bilenko I. A., Hybrid Integrated Dual-Microcomb Source // Physical Review Applied v. 18, 034068 (2022)
8. Chermoshentsev D. A., Shitikov A. E., Lonshakov E. A., Grechko G. V., Sazhina E. A., Kondratiev N. M., Masalov A. V., Bilenko I. A., Lvovsky A. I., Ulanov A. E., Dual-laser self-injection locking to an integrated microresonator // Optics Express v. 30, 17094 (2022)
9. Kondratiev, N. M., Lobanov, V. E., Shitikov, A. E., Galiev, R. R., Chermoshentsev, D. A., Dmitriev, N. Y., ... & Bilenko, I. A. Recent advances in laser self-injection locking to high-Q microresonators. *Frontiers of Physics*, 18(2), 21305 (2023).
10. Voloshin, A. S., Kondratiev, N. M., Lihachev, G. V., Liu, J., Lobanov, V. E., Dmitriev, N. Y., ... & Bilenko, I. A. Dynamics of soliton self-injection locking in optical microresonators. *Nature communications*, 12(1), 235. (2021).