

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИАиЭ СО РАН

Академик РАН

Бабин Сергей Алексеевич



«3» сентября 2025 г

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматике и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук
(ИАиЭ СО РАН)

Диссертация «Исследование эффектов сужения и уширения спектров пикосекундных импульсов в волоконных лазерных системах» выполнена в тематической группе волоконных лазеров с синхронизацией мод (№ 17-1) ИАиЭ СО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Ефремов Владислав Дмитриевич работал в ИАиЭ СО РАН в должности и.о. инженера-исследователя, и.о. младшего научного сотрудника и младшего научного сотрудника, а также проходил обучение в аспирантуре ИАиЭ СО РАН в период с 2019 г. по 2023 г.

В 2019 г. окончил магистратуру физического факультета Новосибирского государственного университета по направлению подготовки 03.04.02 «Физика». В 2023 г. окончил аспирантуру ИАиЭ СО РАН по направлению 03.06.01. «Физика и астрономия», специальность 01.04.05 «Оптика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов № 25/2 выдана 24 июля 2025 г. ИАиЭ СО РАН.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Харенко Денис Сергеевич, ведущий научный сотрудник тематической группы волоконных лазеров с синхронизацией мод (№ 17-1) ИАиЭ СО РАН.

Диссертация «Исследование эффектов сужения и уширения спектров пикосекундных импульсов в волоконных лазерных системах» была рассмотрена на объединенном семинаре УНЦ Квантовая Оптика и Информационные технологии и системы Института автоматике и электрометрии СО РАН 3 июля 2025 года.

На семинаре присутствовали:

Шалагин Анатолий Михайлович, д.ф.-м.н., академик РАН, профессор, ИАиЭ СО
РАН

Бабин Сергей Алексеевич, д.ф.-м.н., академик РАН, ИАиЭ СО РАН

Подивилов Евгений Вадимович, д.ф.-м.н., чл.корр. РАН, ИАиЭ СО РАН

Каблуков Сергей Иванович, д.ф.-м.н., профессор РАН, ИАиЭ СО РАН

Лобач Иван Александрович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Аполонский Александр Анатольевич, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Харенко Денис Сергеевич, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Фруммин Леонид Лазаревич, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Иваненко Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Ильичев Леонид Вениаминович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Поддубровский Никита Романович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Николаев Назар Александрович, к.т.н., ИАиЭ СО РАН

Черкасова Ольга Павловна, д.б.н., ИАиЭ СО РАН

Корольков Виктор Павлович, д.т.н., ИАиЭ СО РАН

Симонов Виктор Александрович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Микерин Сергей Львович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Терентьев Вадим Станиславович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Ткаченко Алина Юрьевна, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Чирков Сергей Викторович, ИАиЭ СО РАН

Серебренников Кирилл Вадимович, ИАиЭ СО РАН

Гервазиев Михаил Дмитриевич, ИАиЭ СО РАН, НГУ

Волоси Виталий Михайлович, ИАиЭ СО РАН

Филонов Антон Александрович, ИЛФ СО РАН

Донцова Екатерина Игоревна, ИАиЭ СО РАН

Кривонос Александр Андреевич, ИАиЭ СО РАН

Каширина Екатерина Константиновна, ИАиЭ СО РАН

По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

Актуальность работы

За последние десятилетия пико- и фемтосекундные импульсы нашли своё применение во многих химических, биологических и физических лабораториях среди новых методов спектроскопии, метрологии и визуализации. Исследования показывают, что требуемые характеристики могут достигаться в волоконных лазерах, а они выгодно отличаются от ближайших конкурентов, твердотельных лазеров, относительно низкой стоимостью, компактностью и разнообразием характеристик выходного излучения. Оптическое волокно выделяется множеством нелинейных эффектов, и это в том числе способствовало стремительному развитию волоконных лазеров. В результате, на данный момент имеется множество подходов к генерации импульсов. Для достижения пикосекундной длительности в волоконной оптике используют ряд методов, позволяющих достичь состояния синхронизации мод. Их принято делить по характеру воздействия на две группы: активные и пассивные. Среди последних выделяют те, что основаны на искусственных насыщающихся поглотителях. Так называют набор оптических элементов, которые вместе имитируют нелинейное поглощение за счёт нелинейных эффектов третьего порядка в волокне. Два самых распространённых метода: нелинейное усиливающее петлевое зеркало и насыщающийся поглотитель на основе эффекта нелинейного вращения поляризации. Они известны давно, однако до сих пор позволяют получать новые результаты. Актуальным вопросом остаётся контроль выходных характеристик генерируемых импульсов и поиск предельных значений. С другой стороны одним из важнейших параметров пикосекундных импульсов является ширина их оптического спектра. От этого сильно зависит, как в дальнейшем можно использовать выходное излучение. Широкополосные импульсы можно усилить и сжать до фемтосекундных значений, получая востребованные в промышленности крайне высокие пиковые мощности. Узкополосные же оказываются востребованы в биомедицине. Вместе с тем, давно существует такой мощный инструмент изучения, как численное моделирование. Оно позволяет заглянуть внутрь резонатора и даёт большие возможности для объяснения нелинейных явлений, некоторые из которых практически невозможно изучить в той же степени экспериментально. Численное моделирование также позволяет предсказать параметры волоконных лазеров под конкретные задачи. И это видится наиболее подходящим способом комплексного изучения ряда волоконных лазерных систем.

В рамках исследования Ефремовым В.Д. впервые было проведено полноценное масштабное численное моделирование линейной схемы волоконного оптического параметрического генератора (ВОПГ), за счёт чего удалось проанализировать области стабильной генерации (в том числе с точки зрения практического применения). Автором работы также предложена и численно изучена уникальная схема кольцевого ВОПГ с двухплечевой синхронной накачкой. Моделирование узкополосного волоконного лазера с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации (НВП) с чирпованной волоконной брегговской решёткой продемонстрировало, что основную роль в формировании импульса играет эффект самосжатия спектра. Данное явление впервые обнаружено внутри лазерного резонатора. В результате же моделирования широкополосного волоконного лазера с синхронизацией мод на основе эффекта НВП впервые продемонстрирована зависимость ширины спектра генерируемых импульсов от коэффициента пропускания при низкой мощности амплитудного самомодулятора.

Личное участие соискателя

В ходе выполнения работ Ефремов В.Д. принимал активное участие в постановке задач, составлении численных моделей волоконных лазерных систем, проведении экспериментов, анализе и обсуждении результатов, а также презентации результатов на научных конференциях и оформлении результатов в виде научных публикаций. При выполнении диссертационной работы Ефремов В.Д. проявил себя как квалифицированный специалист, умеющий работать в коллективе, решать сложные задачи, а также проводить исследования на высоком научном уровне.

Новизна

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Для ВОПГ впервые было проведено масштабное численное моделирование в чрезвычайно широком диапазоне параметров. Обнаружено, что области стабильных режимов генерации значительно расширяются с увеличением длины пассивного волокна и имеют нестабильную центральную часть. В результате показано, что максимальная энергия параметрического импульса может достигать 40 нДж с типичным параметром чирпа около 8 при использовании в резонаторе пассивного волокна длиной 100 м. Полученный набор расчётных

данных содержит область с наиболее подходящими параметрами для спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света и может быть полезен для дальнейшей разработки экспериментальной установки.

2. Впервые выполнено численное моделирование уникальной схемы ВОПГ с двухплечевой синхронной накачкой, предложенной автором данной работы. Найдены области стабильных режимов генерации при синхронной накачке импульсами, отстроенными по длине волны на 1 нм. Это привело к сужению области и увеличению энергии до 57 нДж по сравнению с линейным ВОПГ. Сдвиг центральной длины волны параметрических импульсов увеличился в два раза (до 12 нм), а ширина спектра возросла до 2,1 нм. Показано, что двухплечевая синхронная накачка позволяет существенно расширить область достижимых параметров параметрических импульсов по аналогии с отстроенными фильтрами генератора Мамышева. Таким образом, метод с использованием двухплечевой синхронной накачки имеет большой потенциал для практической реализации как в ВОПГ, так и в схемах на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния.
3. Численно продемонстрирована возможность использовать нелинейное усиливающее петлевое зеркало как спектральный фильтр для подавления пьедестала оптических импульсов. Найдены максимумы коэффициента пропуска на плоскости таких параметров, как эффективная длина волокна в кольце и коэффициент усиления. Обнаружено, что доля пьедестала в энергии импульса падает с 34 до 5,6 % при эффективной длине кольца порядка 1 км и усилении более 5 раз.
4. Экспериментально и численно исследован полностью волоконный лазер с синхронизацией мод на основе эффекта НВП, который генерировал импульсы пикосекундной длительности на длине волны 1030,2 нм с наименьшей шириной спектра 0,12 нм и энергией 0,6 нДж. Чирпованная волоконная брэгговская решётка обеспечивала крайне большую аномальную дисперсию резонатора, около $-81,2 \text{ пс}^2$, что является наибольшим значением, продемонстрированным в литературе на момент выполнения эксперимента. Численное моделирование показало хорошее согласие с экспериментальными измерениями и позволило исследовать внутррезонаторную динамику импульсов. Впервые обнаружен эффект самосжатия спектра за счёт фазовой самомодуляции внутри лазерного резонатора. Кроме того, показано, что ширина спектра может быть ещё

уменьшена до 0,08 нм за счёт увеличения дисперсии до -125 пс^2 , и она не зависит от ширины спектра chirпованной волоконной брэгговской решетки.

5. Для иттербиевого волоконного лазера с синхронизацией мод на основе эффекта НВП была разработана и исследована численная модель, которая показала полное согласие с экспериментальными данными. Раскрыта причина генерации импульсов со сверхшироким спектром в данной схеме и впервые предсказана возможность генерации импульсов с шириной оптического спектра до 100 нм. Это достигается за счёт уменьшения коэффициента пропускания при низкой мощности сигнала амплитудного самомодулятора, что предотвращает переход к многоимпульсным режимам генерации при увеличении мощности накачки.

Степень достоверности результатов

Все полученные результаты не противоречат известным научным положениям и результатам других работ. Достоверность результатов численного моделирования обеспечивается прямым сравнением модельных данных с экспериментальными результатами (там, где это возможно), а также согласованностью с аналитическими решениями и результатами, полученными другими авторами. Во время эксперимента использовались хорошо проверенные методики измерений. Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых мировых журналах и представлены на международных конференциях, что свидетельствует об обоснованности и достоверности сделанных выводов.

Практическая значимость

В ходе данной работы был разработан относительно простой и доступный инструмент для моделирования ряда волоконных лазерных систем, в особенности лазеров с синхронизацией мод. Выработана методика автоматической оценки стабильности режима генерации во время численных расчётов. Сами модели позволили определить основные параметры резонаторов, на которые необходимо обращать внимание при проведении экспериментов. А именно, влияние длины пассивного волокна на размер области стабильной генерации волоконных оптических параметрических генераторов, а также влияние величины аномальной дисперсии, вносимой chirпованной аномальной решеткой на ширину спектра импульсов в лазере с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации.

Соответствие специальности

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика», так как тематика и методы исследования соответствуют паспорту специальности в части физико-математических наук.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты работы докладывались соискателем лично на следующих конференциях и семинарах: 9-й Международный семинар по волоконным лазерам (2020, онлайн), международная конференция «SPIE/COS Photonics Asia» (2021, онлайн), Всероссийская конференция по волоконной оптике (2021, Пермь, Россия), международная конференция «20th International Conference Laser Optics» (2022, Санкт-Петербург, Россия), 10-й Международный семинар по волоконным лазерам (2022, Академгородок, Новосибирск, Россия), VII Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего – наука молодых» (2022, онлайн), Всероссийская конференция по волоконной оптике (2023, Пермь, Россия), международная конференция «21th International Conference Laser Optics» (2024, Санкт-Петербург, Россия).

Результаты диссертационной работы подробно отражены в 5-ти публикациях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных:

1. Ефремов В. Д., Антропов А. А., Харенко Д. С. Подавление пьедестала сверхкоротких импульсов при помощи нелинейного усиливающего петлевого зеркала // Прикладная фотоника. – 2020. – Т. 7. – № 3.
2. Ефремов В. Д., Харенко Д. С. Численное исследование схемы волоконного оптического параметрического генератора с двухплечевой синхронной накачкой // Квант. Электроника. – 2022. – Т. 11 – С. 979–983.
3. Efremov V. D. et al. Numerical investigation of energy limit in picosecond fiber optical parametric oscillator // App. Optics. – 2022. – Vol. 61. – P.1806-1810.
4. Abdrakhmanov S. I., Efremov V. D. et al. Ultra-broadband NPE-based femtosecond fiber laser // MDPI Photonics. – 2023. – Vol. 10. – P. 85.
5. Efremov V.D. et al. Self-compressed to narrowband picosecond pulses generated by extremely large anomalous net cavity dispersion // Opt. Lett. – 2025. – Vol. 50, № 5. – P. 1613–1616.

Диссертация «Исследование эффектов сужения и уширения спектров пикосекундных импульсов в волоконных лазерных системах» Ефремова Владислава Дмитриевича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика».

Председатель семинара

д. ф.-м. н., профессор, академик РАН

Шалагин А.М.

Секретарь семинара

к. ф.-м. н.

Лобач И.А.