

На правах рукописи



Ефремов Владислав Дмитриевич

**Исследование эффектов сужения и уширения
спектров пикосекундных импульсов в волоконных
лазерных системах**

Специальность 1.3.6 —
«Оптика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
ФГБУН Институт автоматики и электрометрии СО РАН
Харенко Денис Сергеевич

Официальные оппоненты: **Анашкина Елена Александровна**,
доктор физико-математических наук,
ФГБУН ФИЦ Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН
Камынин Владимир Александрович,
кандидат физико-математических наук,
ФГБУН ФИЦ Институт общей физики им.
А.М. Прохорова РАН

Ведущая организация: Научно-исследовательский технологический
институт имени С.П. Капицы ФГБОУ ВО
Ульяновского государственного университета

Защита состоится **10 сентября 2026 г. в 10 часов** на заседании диссертационного совета 24.1.028.01 (Д 003.005.02) при Институте автоматики и электрометрии СО РАН по адресу: 630090, Новосибирская область, г. Новосибирск, пр-кт Академика Коптюга, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматики и электрометрии СО РАН.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 630090, Новосибирская область, г. Новосибирск, пр-кт Академика Коптюга, д.1, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.028.01 (Д 003.005.02).

Автореферат разослан "___" _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.028.01 (Д 003.005.02),
Д.ф.-м.н., проф.



Ильичев Л. В.

Общая характеристика работы

Работа посвящена численному и экспериментальному исследованию волоконных лазерных систем с точки зрения оказываемого их параметрами влияния на ширину спектров пикосекундных импульсов.

Актуальность темы. За последнее десятилетие пикосекундные импульсы нашли своё применение во многих химических, биологических и физических лабораториях среди новых методов спектроскопии, метрологии и визуализации [1–3]. 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 [4–6]. 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 [7]. 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, который имитирует нелинейное поглощение за счёт нелинейных эффектов третьего порядка в волокне. Два самых распространённых из них метода синхронизации мод: нелинейное усиливающее петлевое зеркало [8] и насыщающийся поглотитель на основе эффекта нелинейного вращения поляризации [9]. Они известны давно, однако до сих пор позволяют получать новые результаты [10–14]. 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 то, как в дальнейшем можно использовать выходное излучение. Широкополосные импульсы можно усилить и сжать до фемтосекундных значений, получая востребованные в промышленности крайне мощные импульсы. Узкополосные же оказываются востребованы в биомедицине [15]. Вместе с тем, давно существует такой мощный инструмент исследования, 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.

Целью данной работы является исследование эффектов уширения и сужения оптических спектров, возникающих при формировании стабиль-

ных импульсов внутри волоконных лазерных систем. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы распространения излучения по оптическому волокну, а также существующие в нём нелинейные эффекты.
2. Подобрать или создать подходящий под поставленную цель и доступные ресурсы инструмент для численного моделирования.
3. Провести численное моделирование различных вариантов волоконных лазеров на основе искусственных насыщающихся поглотителей и других методов генерации пикосекундных импульсов.
4. Определить параметры исследуемых волоконных лазерных систем, оказывающих влияние на ширину спектра.
5. Провести сравнение результатов численных исследований с экспериментальными результатами.

Научная новизна: данной работы состоит в обнаружении ряда практически значимых особенностей режимов генерации для ряда волоконных лазерных систем, таких как волоконные лазеры с синхронизацией мод на основе искусственных насыщающихся поглотителей (ИНП) и волоконные параметрические генераторы с синхронной накачкой. В частности, впервые 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). Предложена и изучена уникальная схема кольцевого ВОПГ с двухплечевой синхронной накачкой. В результате моделирования широкополосного волоконного лазера с синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации (nonlinear polarization evolution, NPE) впервые продемонстрирована зависимость ширины спектра генерируемых импульсов от коэффициента пропускания малого сигнала $\rho_{\min}$. И, наконец, моделирование узкополосного NPE-лазера с chirпованной волоконной брегговской решёткой (chirped fiber bragg grating, CFBG) продемонстрировало, что основную роль в формировании импульса играет эффект самосжатия спектра. Надо отметить, что последнее явление внутри лазерного резонатора было обнаружено впервые.

Практическая значимость работы заключается в разработке относительно простого для освоения и доступного инструмента 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 наиболее значимые параметры резонаторов, на которые необходимо обращать внимание при проведении экспериментов. Например, показано ключевое влияние длины пассивного волокна на размер области стабильной генерации ВОПГ, а также определяющее влияние величины

аномальной дисперсии, вносимой CFBG, на ширину спектра импульсов в NPE-лазере.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Двухплечевая синхронная накачка в волоконном оптическом параметрическом генераторе расширяет область достижимых параметров генерируемых импульсов, увеличивая возможность перестройки несущей длины волны до 12 нм, а ширину спектра — до 2,1 нм.
2. Нелинейное усиливающее петлевое зеркало, используемое как спектральный фильтр, подавляет пьедестал оптического импульса в частотной области, уменьшая долю энергии в нём с 34 до 5,6 % при длине пассивного волокна в кольце порядка 1 км.
3. Генерация узкополосных ($\sim 0,12$ нм) импульсов пикосекундной длительности в волоконном лазере с синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации достигается внедрением в схему chirпованной волоконной брэгговской решёткой с большой аномальной дисперсией (от -30 до -125 пс²). Возникающий внутри резонатора эффект самосжатия спектра определяет ширину спектра генерируемых импульсов и нивелирует влияние полосы пропускания решётки.
4. Уменьшение коэффициента пропускания амплитудного самомодулятора для сигнала с низкой пиковой мощностью до уровня менее 3,5 % позволяет увеличить как порог перехода в многоимпульсный режим генерации, так и достижимую ширину спектра импульсов, генерируемых иттербиевым волоконным лазером с синхронизацией мод, до 60 нм и более.

Достоверность полученных 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.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 9-м Международном семинаре по волоконным лазерам (2020, онлайн), международной конференции «SPIE/COS Photonics Asia» (2021, онлайн), Всероссийской конференции по волоконной оптике (2021, Пермь, Россия), международной конференции «20th International Conference Laser Optics» (2022, Санкт-Петербург, Россия), 10-м Международном семинаре по волоконным лазерам (2022, Академгородок, Новосибирск, Россия), VII Всероссийском молодежном научном форуме «Наука будущего – наука молодых» (2022, онлайн), Всероссийской конференции по волоконной оптике

(2023, Пермь, Россия), международной конференции «21th International Conference Laser Optics» (2024, Санкт-Петербург, Россия).

Личный вклад. В ходе работы автором лично были составлены численные модели волоконных резонаторов, а также значительно модифицирована библиотека для расчётов (в том числе выполнена её адаптация для проведения вычислений на графических ускорителях). Помимо этого, автором была предложена и численно исследована уникальная схема кольцевого ВОПГ с двухплечевой накачкой. Также автором была собрана и исследована экспериментальная установка узкополосного волоконного лазера с синхронизацией мод на основе эффекта NPE.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 5 из которых изданы в рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных, 7 — в тезисах докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации **110** страниц текста с **31** рисунком и 2 таблицами. Список литературы содержит **128** наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, аргументируется научная новизна, показывается практическая значимость полученных результатов, представляются выносимые на защиту научные положения, а также даётся описание структуры работы.

Первая глава посвящена обзору волоконных лазеров, генерирующих импульсы пикосекундной длительности. Перечислены причины бурного развития волоконной оптики за прошедшие десятилетия, одной из которых является широкая область практических применений: от промышленности до биомедицины. Последнему уделено особое внимание в виду комплексного набора требований к источникам излучения. С прицелом на практическое применение рассмотрены способы получения пикосекундных импульсов с заданной шириной спектра. А именно — ВОПГ, как привлекательные источники излучения для спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). Также выделено три способа получения пикосекундных узкополосных импульсов, которые подойдут для накачки ВОПГ. Самые перспективные из них заключаются в использовании таких ИНП, как нелинейное усиливающее петлевое зеркало (nonlinear amplifying loop mirror, NALM) и амплитудного самомодулятора на основе эффекта NPE. Отдельно отмечается, что с использованием последнего возможна генерация и широкополосных импульсов.

Во второй главе подробно описывается теоретическая основа для численного моделирования распространения излучения по оптическому волокну, а именно — Нелинейное уравнение Шрёдингера (НУШ), которое обсуждается в двух вариантах: стандартное и обобщённое. В обоих случаях изложены условия применимости НУШ и учитываемые ими нелинейные эффекты, в том числе вынужденное комбинационное рассеяние. Также приведено описание двух ключевых способов численного решения НУШ: метод расщепления по физическим процессам и метод Рунге-Кутты 4-го порядка в представлении взаимодействий. Отдельный большой раздел посвящен написанной на языке Python библиотеке программирования, предназначенной для моделирования оптических волоконных систем: Python-based optical fibre system simulator (PyOFSS) [16]. Подробно описывается её структура и модули, при помощи которых можно моделировать отдельные волоконные элементы (оптический разветвитель, спектрально-селективный разделитель длин волн и др.) или оптические явления (насыщающееся усиление, амплитудный самомодулятор). В конце приведён алгоритм автоматического определения стабильных режимов генерации при счёте и способ их отображения на карте параметров.

Третья глава посвящена численному исследованию двух конфигураций ВОПГ: линейной и кольцевой с двухплечевой синхронной накачкой. В разделе 3.1 численно изучена возможность использования линейного ВОПГ на основе фотонно-кристаллического волокна (photonic crystal fiber, PCF) в качестве источника для спектроскопии КАРС. На основе предпо-

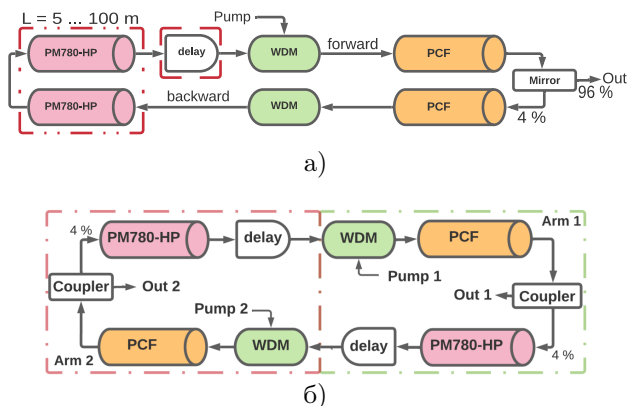


Рисунок 1 — а) численная модель линейной схемы ВОПГ: PCF — фотонно-кристаллическое волокно, WDM — спектрально-селективный разделитель длин волн, PM780-HP — пассивное волокно. б) численная модель кольцевой схемы ВОПГ с двухплечевой синхронной накачкой. Пунктиром выделены плечи.

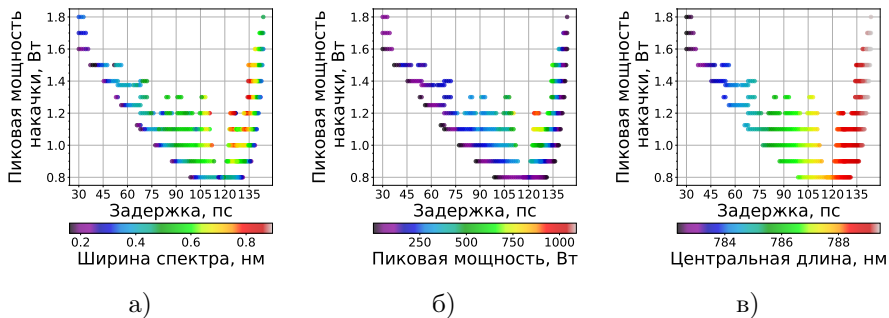


Рисунок 2 — Параметры параметрических импульсов стабильных режимов генерации, обнаруженных при моделировании линейной схемы ВОПГ: спектральная ширина (а), пиковая мощность (б) и центральная длины волны (в).

лагаемой схемы составлена численная модель, условный алгоритм которой представлен на Рис. 1а. В качестве накачки использовались импульсы на длине волны 1032 нм с длительностью 80 пс. В результате варьирования их пиковой мощности и величины вносимой задержки, была вычислена область существования стабильных режимов генерации. На Рис. 2 представлены основные параметры генерируемых импульсов в области, полученной в численной модели при 50 м пассивного волокна (PM780-HP) и 33 см РСФ. Важно отметить, что Краффт с соавторами сформулировали требования к лазерам, используемым в КАРС [15]. Вычисленный набор данных содержит подходящую по параметрам область на Рис.2а, которая соответствует задержкам от 80 до 100 пс и пиковой мощности накачки от 900 до 1200 Вт.

В разделе 3.2 численно исследована уникальная схема, предложенная автором данной работы. Суть заключается в реализации кольцевой схемы ВОПГ, которая включает в себя два одинаковых плеча, состоящих из элементов линейной схемы. Каждое из них имеет свой отдельный вход для излучения накачки (двухплечевая накачка), что позволяет смещать длину волны импульсов накачки относительно друг друга по аналогии с отстроенными спектральными фильтрами генератора Мамышева [17]. Алгоритм численной модели представлен на Рис. 16. Оба плеча синхронно накачивались узкополосными импульсами на различных длинах волн 1032 и 1033 нм, что позволило попасть в разные точки кривой фазового синхронизма РСФ. Как и при моделировании линейного ВОПГ, в результате варьирования пиковой мощности импульсов накачки и величины вносимой задержки, была вычислена область существования стабильных режимов генерации. На Рис. 3 представлены ширина спектра и центральная длина волны генерируемых импульсов в полученной области. Возможная перестройка по центральной длине волны при изменении величины задержки

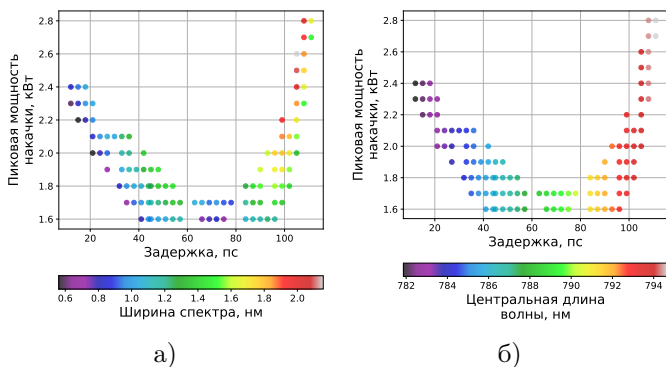


Рисунок 3 — Параметры параметрических импульсов стабильных режимов генерации, обнаруженных при моделировании кольцевой схемы ВОПГ с двухплечевой синхронной накачкой: ширина спектра (а) и центральная длина волны (б).

выросла до 12 нм, против 6 нм в линейной схеме (Рис. 2в). Также в два раза выросла максимальная ширина спектра, до 2,1 нм. Сделан вывод, что в данной схеме ВОПГ с двухплечевой синхронной накачкой существуют режимы генерации параметрических импульсов, недоступные в обычных схемах ВОПГ с одноплечевой накачкой.

В четвертой главе приведено исследование способов получения пикосекундных импульсов с заданной шириной спектра. Рассмотрено три схемы, в основе которых лежат искусственные насыщающиеся поглотители.

В разделе 4.1 численно исследована возможность использовать NALM, как спектральный фильтр для подавления спектрального пьедестала. Он возникает, когда пикосекундный импульс пропускают через узкополосный фильтр, например, волоконную брэгговскую решётку, что приводит к искажению спектра после усиления. В ходе численного моделирования через NALM пропускался импульс с длительностью 20 пс, шириной спектра 0.098 нм и пьедесталом 5.6 нм. В результате варьирования коэффициента усиления и эффективной длины волокна в NALM построена карта максимумов коэффициента пропускания, достижимых при заданных параметрах схемы (Рис. 4а). В найденных точках вычислена доля пьедестала от полной энергии импульсов после прохождения NALM (Рис. 4б). В результате с начальных 34 % она упала до 5.6 % при длинах около 1 км, что определено как оптимальные параметры для подавления спектрального пьедестала.

Раздел 4.2 посвящён численному и **экспериментальному** исследованию прямой генерации узкополосных пикосекундных импульсов. Для этого в схему волоконного лазера с синхронизацией мод на основе эффекта NPE

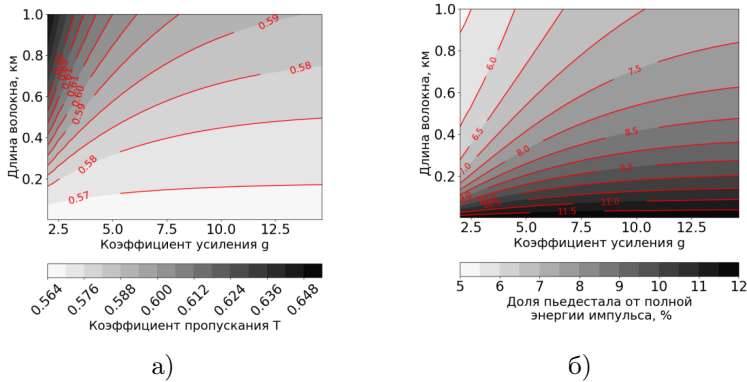


Рисунок 4 — **а)** карта максимумов коэффициента пропускания NALM модельного импульса со спектральным пьедесталом; **б)** доля пьедестала от полной энергии импульса после прохождения NALM.

была добавлена CFBG, обеспечивающая большую аномальную дисперсию, равную $-81,6 \text{ пс}^2$. Полоса пропускания CFBG составила $0,4 \text{ нм}$, длина — 6 мм , а центральная длина волны — $1030,2 \text{ нм}$. С учётом суммарной дисперсии всех волокон в схеме, равной $0,4 \text{ пс}^2$, полная дисперсия резонатора составила $-81,2 \text{ пс}^2$, что можно считать чрезвычайно большой аномальной дисперсией резонатора, которой на момент выполнения данной работы в подобных схемах никто не достигал. В ходе эксперимента обнаружена генерация импульсов с шириной спектра $0,12 \text{ нм}$ на уровне -3 дБ , частотой

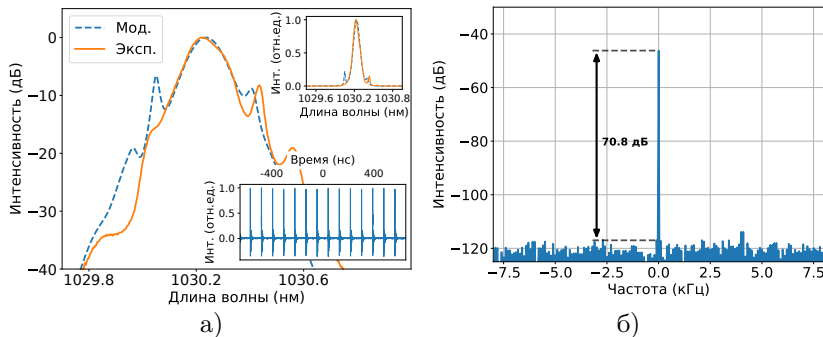


Рисунок 5 — **а)** спектры импульсов, полученные в эксперименте и в результате моделирования (пунктиром). Во вставке: в линейном масштабе (сверху) и последовательность импульсов, измеренная при помощи осциллографа (снизу). **б)** радиочастотный спектр.

повторения 11 МГц и энергией 0,6 нДж. В спектре импульса (Рис. 5а) присутствуют пики Келли, характерные для резонатора с аномальной дисперсией. На Рис. 5б представлен радиочастотный спектр, демонстрирующий высокое соотношение сигнал/шум в 70,8 дБ.

В соответствии с экспериментальной установкой была составлена численная модель данного лазера. В качестве усиления использовалась функция с эффектом насыщения в виде:

$$g(E) = \frac{g_0}{1 + E/E_{\text{sat}}},$$

где g_0 — коэффициент усиления малого сигнала в дБ, E — энергия импульса, $E_{\text{sat}} = P_{\text{sat}} \cdot T_R$ — энергия насыщения, T_R — время обхода импульса по резонатору. При моделировании всех волокон в схеме использовались следующие параметры: $\beta_2 = 22 \text{ пс}^2/\text{км}$, $\beta_3 = 0,037 \text{ пс}^3/\text{км}$, $\gamma = 6 \text{ 1}/(\text{Вт} \cdot \text{км})$, что соответствует параметрам стандартного волокна с сохранением поляризации (polarization maintaining, PM). В результате моделирования и подбора параметров был получен спектр (Рис. 5а), ширина которого совпала с высокой точностью с измеренной в эксперименте и равнялась 0,12 нм при длительности в 13,7 пс. На Рис. 6 показана эволюция длительности и ширины спектра на уровне -3 дБ по мере распространения модельного импульса по резонатору. Стоит обратить внимание на следующий момент: в начале обхода резонатора, сразу после добавки дисперсии, ширина спектра монотонно уменьшается с 0,126 нм до 0,1 нм, пока распространяется по участку стандартного SMF с нормальной дисперсией. Сужение, пускай и относительно малое, в данных условиях является нетипичным поведением. Это можно объяснить действием эффекта фазовой самомодуляции (ФСМ), который при особых условиях приводит к сжатию спектра, а не

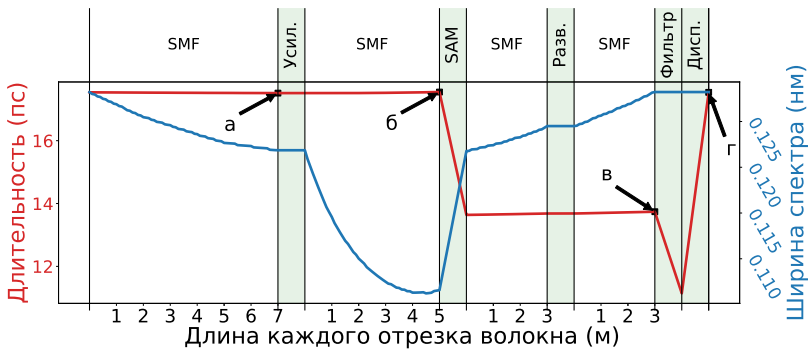


Рисунок 6 — Эволюция длительности и ширины спектра моделируемых импульсов внутри резонатора. Модули с точечной функцией воздействия отмечены зеленым цветом, а их длина на графике относительна и выбрана лишь для удобства.

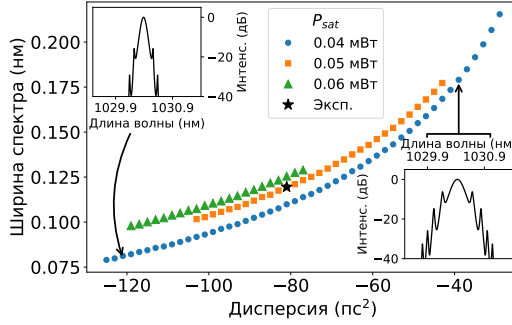


Рисунок 7 — Ширина спектров смоделированных импульсов в зависимости от дисперсии CFBG при ширине фильтра в 40 нм. Каждая точка — это режим стабильной генерации. Знаками круга, квадрата и плюса отмечены различные P_{sat} в значениях 0,04, 0,05 и 0,06 мВт, соответственно. Чёрная звезда — режим генерации, подобранный под экспериментальные результаты. Во вложениях: примеры спектров при $\beta_2 = -119$ и -39 пс².

расширению, как принято считать. Необходимо, чтобы импульс имел отрицательный чирп и распространялся по волокну с нормальной дисперсией без сильной нелинейности [18]. В таком случае «передние» частоты будут понижаться, а «задние» — повышаться. Вместе они будут стремиться к центру, приводя в результате к сжатию спектра импульса, что можно назвать эффектом самосжатия спектра. Моделирование показывает, что после добавления дисперсии в конце обхода (точка «г» на Рис. 6) импульс приобретает отрицательный чирп, из-за чего впоследствии испытывает самосжатие спектра, распространяясь по участкам волокна с нормальной дисперсией. Насколько нам известно, такое влияние эффекта ФСМ внутри волоконного резонатора ранее никто не обнаруживал.

Отсюда предположено, что полоса пропускания CFBG играет не такую важную роль, как ожидалось, выступая лишь в качестве фильтра для боковых полос (пиков Келли). Чтобы проверить это, ширина фильтра в численной модели была увеличена в 100 раз, до 40 нм. На Рис. 7 показана зависимость ширины спектра импульсов от добавочной дисперсии для этого случая. Каждая точка — это режим стабильной генерации, который был найден при варьировании дисперсии CFBG от -125 до -29 пс² и насыщения усиления P_{sat} от 0,04 до 0,06 мВт. Хорошо видно, что увеличение полосы пропускания никак не повлияло на ширину спектра генерируемых импульсов. Она варьируется от 0,08 до 0,215 нм и зависит только от дисперсии CFBG. Таким образом, сделан вывод, что возникающий из-за большой аномальной дисперсии эффект самосжатия спектра определяет ширину спектра генерируемых импульсов и нивелирует влияние полосы пропускания фильтра.

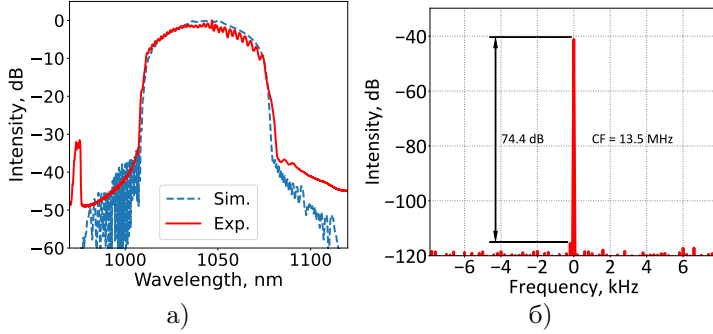


Рисунок 8 — а) спектры импульсов, полученные в эксперименте и в результате моделирования (пунктиром); б) радиочастотный спектр

В разделе 4.3 представлены результаты проведённого на основе эксперимента численного исследования волоконного лазера с синхронизацией мод на основе NPE с объёмным спектральным фильтром. Типичные значения длины широкополосного спектра, получаемые в подобных схемах без использования специальных методов или высоконелинейного волокна, лежат в окрестностях 20 нм. Однако в эксперименте [A1], проведённом в нашей группе, впервые были получены ультраширокие импульсы (около 60 нм). Добавленный в схему спектральный фильтр на основе дифракционных решёток обладал полосой пропускания 1,62 нм на уровне -3 дБ с центральной длиной волны 1043 нм. Полученные в эксперименте импульсы имели ширину спектра 57 нм на уровне -10 дБ (Рис. 8а). При частоте повторения 13,5 МГц энергия импульсов составила 2,2 нДж. Радиочастотный спектр показан на Рис. 8б с соотношением сигнал/шум 74,4 дБ. Длительность импульсов на выходе из резонатора составила 14 пс и после сжатия при помощи пары внешних дифракционных решёток уменьшилась до 149 фс.

Для объяснения данного феномена была составлена численная модель, включающая в себя амплитудную самомодуляцию (self-amplitude modulation, SAM), которая реализуется при синхронизации мод на основе эффекта NPE [19] в скалярном приближении. SAM воздействовала на поле точно (мгновенно) через функцию пропускания:

$$\rho(P) = \rho_{\max} - \left(\frac{P}{P_{\text{cr}}} - 1 \right)^2 (\rho_{\max} - \rho_{\min}),$$

где P — мгновенная мощность, $\rho_{\min}$ — пропускание при малой мощности, а $\rho_{\max}$ — пропускание при критической мощности P_{cr} . В результате подбора параметров был найден режим генерации, наиболее согласующийся с экспериментальным (Рис. 8а). Параметры SAM при этом составили

$P_{cr} = 1,9$ кВт, $\rho_{max} = 0,8$ и $\rho_{min} = 0,032$, а усиления $g_0 = 25$ дБ и $P_{sat} = 0,3$ мВт. Вычисленная эволюция спектральной ширины внутри резонатора показала, что уширение спектра происходит сразу после усиления в относительно короткой SMF части резонатора из-за сильного влияния эффекта ФСМ. Однако это не объясняет того, почему ранее подобный результат не был получен. Для более тщательного анализа была составлена карта стабильных режимов генерации на области таких параметров, как насыщение усиления P_{sat} и коэффициент пропускания SAM при малой мощности ρ_{min} . На Рис. 9 показаны выходные характеристики импульсов в найденной области. Крестиками на Рис.9а отмечены импульсы, соотнесённые с полученными в эксперименте. Они расположены на краю области одноимпульсной генерации из следующих соображений. Чтобы получать импульсы с более широким спектром, нужно увеличивать P_{sat} , то есть мощность накачки (Рис. 96). С другой стороны, повышение только P_{sat} в эксперименте приводит к переходу в многоимпульсный или нестабильный режим генерации. Таким образом, мы предполагаем, что по оси X экспериментальные точки находятся на краю области стабильной генерации. А чтобы сохранить одноимпульсный режим и увеличить ширину спектра, нужно вместе с повышением P_{sat} уменьшать коэффициент пропускания малого сигнала ρ_{min} . Это довольно неожиданный результат, так как напрямую ρ_{min} никак не влияет на параметры генерируемого импульса, что хорошо видно по горизонтальному характеру распределения цветовой шкалы на Рис. 9. Таким образом, сделан вывод, что именно уменьшение коэффициента пропускания SAM до уровня менее 3,5 % позволяет генерировать импульсы с шириной спектра 60 нм и более без использования специальных методов.

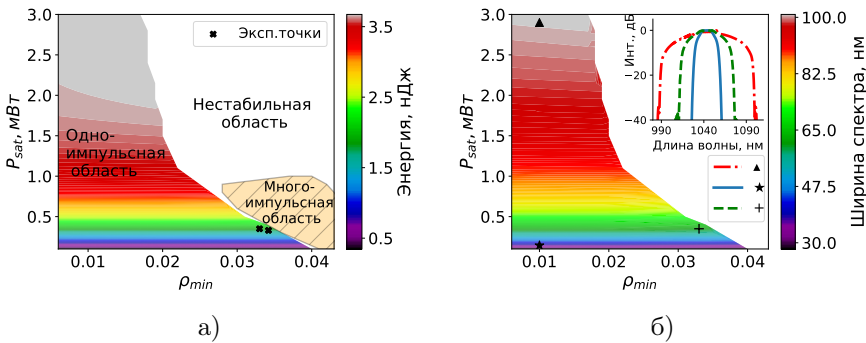


Рисунок 9 — Параметры импульсов стабильных режимов генерации: энергия (а) и ширина спектра на уровне -10 дБ (б). Крестиками (а) обозначены режимы, соответствующие эксперименту. Во вставка (б): спектры в точках карты параметров, отмеченных треугольником, звездой и крестом.

В заключении сформулированы основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

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 при использовании в резонаторе пассивного волокна длиной 100 м. Типичный параметр чирпа составлял около 8, что указывает на то, что такие импульсы являются высокочирпованными диссипативными солитонами. Полученный набор расчётных данных содержит область с наиболее подходящими параметрами для КАРС и может быть полезен для дальнейшей разработки экспериментальной установки.
2. Впервые было 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 относительно друг друга 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. Сделан вывод, что метод с использованием двухплечевой синхронной накачки имеет большой потенциал для практической реализации как в ВОПГ, так и в схемах на основе эффекта ВКР, но из-за большого числа изменяемых параметров нуждается в дальнейшем исследовании.
3. При помощи численного моделирования была продемонстрирована возможность использовать NALM как спектральный фильтр для подавления пьедестала оптических импульсов. Найдены максимумы коэффициента пропускания T_{max} на плоскости таких параметров, как эффективная длина NALM и коэффициент усиления. Обнаружено, что доля пьедестала в энергии импульса падает с 34 до 5,6 % при длинах пассивного волокна порядка 1 км. Как итог, определена область наиболее подходящих для подавления спектрального пьедестала параметров.
4. Численно и экспериментально исследован полностью волоконный лазер с синхронизацией мод на основе эффекта NPE, который генерировал импульсы пикосекундной длительности на длине вол-

ны 1030,2 нм с наименьшей шириной спектра 0,12 нм, энергией 0,6 нДж и длительностью 16 пс CFBG обеспечивала рекордно большую аномальную дисперсию резонатора, около $-81,2 \text{ пс}^2$. В численной модели обнаружен эффекта самосжатия спектра за счёт ФСМ 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 полосы пропускания CFBG.

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, предсказана возможность генерации импульсов с шириной оптического спектра до 100 нм. Это достигается за счет уменьшения коэффициента пропускания малого сигнала SAM до уровня порядка 1%, что предотвращает переход к многоимпульсным режимам генерации при увеличении мощности накачки.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Ultra-Broadband NPE-Based Femtosecond Fiber Laser / S. I. Abdrakhmanov [et al.] // Photonics. — 2023. — Vol. 10, no. 1. — P. 85.
- A2. *Ефремов, В. Д.* Подавление пьедестала сверхкоротких импульсов при помощи нелинейного усиливающего петлевого зеркала / В. Д. Ефремов, А. А. Антропов, Д. С. Харенко // Прикладная Фотоника. — 2020. — Т. 7, № 3. — С. 80—89.
- A3. *Ефремов, В. Д.* Подавление пьедестала сверхкоротких импульсов при помощи нелинейного усиливающего петлевого зеркала / В. Д. Ефремов, А. А. Антропов, Д. С. Харенко // 9-й Международный семинар по волоконным лазерам. — 2020. — С. 201—202.
- A4. Численное моделирование волоконного оптического параметрического генератора на основе фотонно-кристаллического волокна / В. Д. Ефремов [и др.] // Фотон-экспресс. — 2021. — Т. 174, № 6. — С. 120—121.
- A5. Numerical simulation of a picosecond fiber optical parametric oscillator based on a PCF / V. D. Efremov [et al.] // Quantum and Nonlinear Optics VIII. Vol. 11905. — SPIE. 2021. — P. 125—130.
- A6. *Efremov, V.* Numerical Investigation of a Double Arms Pump Impact in the Fiber Optical Parametric Oscillator / V. Efremov, D. Kharenko // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO). — 2022. — P. 1—1.

- A7. *Efremov, V.* Numerical investigation of the fiber optic parametric oscillator scheme with a dual-arm synchronous pumping / V. Efremov, D. Kharenko // Russian Fiber Lasers. — 2022. — Vol. 2, no. 1. — P. 46—47.
- A8. Numerical investigation of the energy limit in a picosecond fiber optic parametric oscillator / V. D. Efremov [et al.] // Applied Optics. — 2022. — Vol. 61, no. 7. — P. 1806—1810.
- A9. *Ефремов, В. Д.* Численное исследование схемы волоконного оптического параметрического генератора с двухплечевой синхронной накачкой / В. Д. Ефремов, Д. С. Харенко // Квантовая электроника. — 2022. — Т. 52, № 11. — С. 979—983.
- A10. *Ефремов, В. Д.* Исследование генерации узкополосных сверхкоротких импульсов в различных волоконных схемах / В. Д. Ефремов, Д. С. Харенко // Фотон-экспресс. — 2023. — Т. 190, № 6. — С. 450—451.
- A11. *Efremov, V.* Narrowband Ultrashort Pulses Generation in Different Fiber Schemes Using a Highly Chirped Bragg Grating / V. Efremov, D. Kharenko // 2024 International Conference Laser Optics (ICLO). — 2024. — P. 42—42.
- A12. Self-compressed to narrowband picosecond pulses generated by extremely large anomalous net cavity dispersion / V. D. Efremov [et al.] // Optics Letters. — 2025. — Vol. 50, no. 5. — P. 1613—1616.

Список литературы

1. Recent Advances in Applications of Ultrafast Lasers / S. Niu [et al.] // Photonics. — 2024. — Vol. 11, no. 9. — P. 857.
2. *Zhao, W.* Femtosecond-Pulse Fiber Based Amplification Techniques and Their Applications / W. Zhao, X. Hu, Y. Wang // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. — 2014. — Sept. — Vol. 20, no. 5. — P. 512—524.
3. Ultrafast Laser Processing of Materials: A Review / K. C. Phillips [et al.] // Adv. Opt. Photon., AOP. — 2015. — Dec. 31. — Vol. 7, no. 4. — P. 684—712.
4. Several new directions for ultrafast fiber lasers [Invited] / W. Fu [et al.] // Optics Express. — 2018. — Vol. 26, no. 8. — P. 9432—9463.
5. *Xu, C.* Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy / C. Xu, F. W. Wise // Nature Photonics. — 2013. — Vol. 7, no. 11. — P. 875—882.

6. *Fermann, M. E.* Ultrafast fibre lasers / M. E. Fermann, I. Hartl // Nat. Photonics. — 2013. — Vol. 7, no. 11. — P. 868—874.
7. *Lamb, W. E.* Theory of an Optical Maser / W. E. Lamb // Physical Review. — 1964. — Vol. 134, 6A. — A1429—A1450.
8. Nonlinear amplifying loop mirror / M. E. Fermann [et al.] // Optics Letters. — 1990. — Vol. 15, no. 13. — P. 752—754.
9. Passive mode locking by using nonlinear polarization evolution in a polarization-maintaining erbium-doped fiber / M. E. Fermann [et al.] // Optics Letters. — 1993. — Vol. 18, no. 11. — P. 894—896.
10. 20 nJ 200 fs all-fiber highly chirped dissipative soliton oscillator / D. S. Kharenko [et al.] // Opt. Lett. — 2012. — Vol. 37, no. 19. — P. 4104.
11. Ultrafast laser mode-locked using nonlinear polarization evolution in polarization maintaining fibers / J. Szczepanek [et al.] // Optics Letters. — 2017. — Vol. 42, no. 3. — P. 575—578.
12. 976 nm all-polarization-maintaining mode-locked fiber laser based on nonlinear polarization evolution / Y. Jiang [et al.] // Optics Express. — 2023. — Vol. 31, no. 9. — P. 15170—15178.
13. Highly-stable mode-locked PM Yb-fiber laser with 10 nJ in 93-fs at 6 MHz using NALM / Y. Yu [et al.] // Optics Express. — 2018. — Vol. 26, no. 8. — P. 10428—10434.
14. Dissipative soliton generation from a large anomalous dispersion ytterbium-doped fiber laser / J. Zhou [et al.] // Optics Letters. — 2020. — Vol. 45, no. 20. — P. 5768—5771.
15. Developments in spontaneous and coherent Raman scattering microscopic imaging for biomedical applications / C. Krafft [et al.] // Chem. Soc. Rev. — 2016. — Vol. 45, no. 7. — P. 1819—1849.
16. Pyofss: Python-based optical fibre system simulator. — 2023. — (Датум оѣр. 03.09.2025). <https://github.com/galilley/pyofss>.
17. *Mamyshev, P.* All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect / P. Mamyshev // 24th European Conference on Optical Communication. ECOC '98 (IEEE Cat. No.98TH8398). Vol. 1. — 1998. — 475—476 vol.1.
18. Spectral narrowing in the propagation of chirped pulses in single-mode fibers / S. A. Planas [et al.] // Opt. Lett., OL. — 1993. — May 1. — Vol. 18, no. 9. — P. 699—701.
19. Evolution of dissipative solitons in a fiber laser oscillator in the presence of strong Raman scattering / A. E. Bednyakova [et al.] // Opt. Express. — 2013. — Vol. 21, no. 18. — P. 20556—20564.

Ефремов Владислав Дмитриевич

Исследование эффектов сужения и уширения спектров пикосекундных
импульсов в волоконных лазерных системах

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____