

На правах рукописи

УДК 621.373.8

ОРЕХОВ ИЛЬЯ ОЛЕГОВИЧ

**ВОЛОКОННЫЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕР СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ
ИНТЕНСИВНОСТИ И ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ
ЗАДАЧ ЧАСТОТНОЙ МЕТРОЛОГИИ**

Специальность – 2.2.6. «Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: **Дворецкий Дмитрий Алексеевич**,
кандидат технических наук, доцент кафедры
лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им.
Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Герасименко Александр Юрьевич**, д. т. н., доцент,
начальник научно-исследовательской лаборатории
биомедицинских нанотехнологий НИУ МИЭТ
Хегай Александр Михайлович, кандидат физико-
математических наук, научный сотрудник
лаборатории волоконных лазеров и усилителей
Научного центра волоконной оптики им. Е.М.
Дианова РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
ИТМО»

Защита состоится «23» апреля 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.07 при Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Ваш отзыв на автореферат диссертации, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.331.07 по адресу 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н. Э. Баумана (НИУ).

Телефон для справок: +7(915) 100-01-76.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.07,
к.т.н., доцент



Д.Г. Денисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Фемтосекундные волоконные лазеры (ФВЛ) представляют собой когерентные широкополосные источники излучения с равномерно распределёнными оптическими частотами. Основное применение таких лазеров – оптическая частотная метрология, включая абсорбционную спектроскопию, прецизионное измерение времени и сканирующую интерферометрию (СИ) интегральных фотонных устройств. Особенный интерес, на сегодняшний день вызывает метод СИ на основе оптической рефлектометрии частотной области с применением оптических частотных гребёнок (ОЧГ), который успешно был применен для исследования дисперсии микрометрических устройств, всё чаще применяемых в телекоммуникациях и навигации. В этой связи СИ на основе ОЧГ является перспективным методом для неразрушающего контроля оптических микроразмерных устройств и компонентов современной элементной базы. Ключевым моментом для высокоточной фазовой калибровки в СИ на основе ОЧГ является стабильность частоты спектральных линий, генерируемых фемтосекундными лазерами. На протяжении многих лет исследуются методы повышения стабильности генерации фемтосекундных лазеров. В США (С. Диддамс, NIST) Германии (Т. Хенш, Университет имени Людвига и Максимилиана; Н. Пике, Институт квантовой оптики), Австрии (Б. Бернхардт, Грацский технический университет) и России сформировались научные коллективы, занимающиеся этой темой. Несмотря на успехи в этой области, основным способом получения стабильных частотных гребёнок остаётся разработка сложных электронных систем обратной связи для активной стабилизации. Однако влияние структурных компонентов и механизмов синхронизации мод на стабильность характеристик недостаточно изучено, что предполагает потенциал пассивных методов стабилизации ФВЛ и актуальность разработки пассивно стабилизированного ФВЛ для частотной метрологии.

Целью диссертационной работы является разработка лазера фемтосекундных импульсов с пассивной стабилизацией интенсивности и частоты следования импульсов для задач частотной метрологии.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие **задачи**:

- проведён анализ факторов, влияющих на стабильность амплитудно-частотных характеристик выходного излучения ФВЛ;
- разработана оригинальная математическая модель и обоснована схема ФВЛ на основе нелинейной эволюции поляризации (НЭП) с использованием высоконелинейных световодов в составе резонатора, позволяющая учитывать факторы, влияющие на стабильность амплитудно-частотных характеристик ФВЛ;
- впервые создан образец ФВЛ на основе НЭП с использованием высоконелинейных световодов в составе резонатора, работающий в режиме генерации растянутых импульсов и групп связанных солитонов (ГСС), а также проведены экспериментальные исследования стабильности амплитудно-частотных характеристик его выходного излучения;
- исследовано влияние коэффициента экстинкции волоконного изолятора-поляризатора на стабильность амплитудно-частотных характеристик выходного излучения ФВЛ с использованием высоконелинейных световодов в составе резонатора;
- исследовано влияние мощности излучения накачки на группу связанных солитонов высокого порядка.

Объектом исследования является эрбиевый фемтосекундный волоконный лазер с пассивной стабилизацией интенсивности и частоты следования импульсов, работающий в режимах генерации растянутых импульсов и групп связанных солитонов, для использования в качестве источника излучения в сканирующем интерферометре для проведения высокоточных измерений интегральных фотонных устройств.

Предметом исследования являются методы повышения стабильности интенсивности и частоты следования импульсов, генерируемых эрбиевым фемтосекундным волоконным лазером, который может использоваться в качестве источника излучения в сканирующем интерферометре в задачах высокоточной частотной метрологии.

Методы исследования

При решении теоретических и прикладных задач были использованы: методы теории вероятности и математической статистики, методы математического моделирования, методы измерения амплитудно-частотных характеристик излучения фемтосекундного волоконного лазера.

Научная новизна

1. Впервые в мировой практике экспериментально получена генерация группы связанных солитонов с 20 связанными импульсами в эрбиевом фемтосекундном волоконном лазере с высоконелинейным волокном в составе резонатора.

2. Экспериментально определено влияние глубины модуляции насыщающегося поглотителя на основе нелинейной эволюции поляризации в лазерах с синхронизацией мод на стабильность амплитудно-частотных характеристик генерируемого излучения.

3. Разработан метод управления количеством связанных импульсов в группе связанных солитонов высшего порядка без изменения фазового соотношения между импульсами посредством контроля мощности излучения накачки.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование пассивно стабилизированной частотной гребёнки, генерируемой эрбиевым фемтосекундным волоконным лазером, в качестве калибровочного источника в системах, основанных на оптической рефлектометрии частотной области, позволяет снизить ошибку определения пространственной координаты более чем в 25 раз.

2. Увеличение коэффициента экстинкции изолятора-поляризатора, используемого в схеме фемтосекундного волоконного лазера, на 8 дБ позволяет снизить значение спектральной плотности мощности относительного уровня шума интенсивности на 16 дБ при уменьшении девиации Аллана частоты следования импульсов в $1 \cdot 10^4$ раз на времени усреднения, равном 1 с.

3. Изменение мощности излучения накачки фемтосекундного волоконного лазера, работающего в режиме генерации групп связанных солитонов, позволяет последовательно и обратимо менять количество связанных импульсов в группе без изменения фазового соотношения между ними.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в следующем:

- Разработана оригинальная математическая модель, позволяющая оптимизировать схему кольцевых волоконных лазеров фемтосекундных импульсов, а также длины использующихся в них световодов, для реализации режимов генерации групп связанных солитонов высокого порядка и растянутых импульсов.
- Разработан и исследован эрбиевый ФВЛ, работающий в режиме генерации групп связанных солитонов, со СПМ относительного уровня шума интенсивности менее -125 дБн/Гц в полосе частот до 1 МГц и величиной девиации Аллана частоты следования импульсов, не превышающей $6,2 \cdot 10^{-10}$ на времени усреднения, равном 1 с.
- Разработан метод управления количеством связанных импульсов в ФВЛ, посредством контроля мощности излучения накачки в диапазоне от 7 до 17 импульсов.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы основана на ранее разработанных методах, представленных в отечественных и зарубежных источниках исследования и подтверждается согласованностью результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований.

Реализация и внедрение результатов исследований. Результаты диссертационной работы внедрены в ПАО «Газпром Автоматизация» при выполнении НИР «ГАЗ-ПДЛ» для обоснования используемого метода спектроскопии при разработке анализатора метана, диоксида углерода и сероводорода и использованы при создании высокоэффективных методов абсорбционной лазерной спектроскопии природных газовых смесей, что подтверждено соответствующим актом внедрения.

Основные результаты диссертационной работы Орехова И.О. «Волоконный фемтосекундный лазер со стабилизацией интенсивности и частоты следования импульсов для задач частотной метрологии», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.6 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы», были использованы в учебном процессе при составлении лекционного курса по дисциплине «Лазеры ультракоротких импульсов» кафедры лазерных и оптико-электронных систем для подготовки магистров по направлению № 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии».

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались на 16 научно-технических конференциях и симпозиумах: Основные результаты работы докладывались на 16 научно-технических конференциях и симпозиумах: XIII International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications (Томск, 2017 г.), VI международная конференция «Фотоника и информационная оптика» (Москва, 2017 г.), международная конференция «Progress in Electromagnetics Research Symposium 2017» (Санкт-Петербург, 2017 г.), международная конференция «European Conference on Optical Communication 2018» (Рим, 2018 г.), международная конференция «International Conference Laser Optics 2018» (Санкт-Петербург, 2018 г.), международная конференция «The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2019» (Мюнхен, 2019 г.), международная конференция «SPIE Optics + Optoelectronics 2019» (Прага, 2019 г.), международная конференция «Advanced

Solid State Lasers 2019» (Вена, 2019 г.), Всероссийская конференция по волоконной оптике 2019 (ВКВО 2019) (Пермь, 2019 г.), XXX международной конференции «Лазеры в науке, технике, медицине 2019» (Москва, 2019 г.), международная конференция «Frontiers in Optics / Laser Science 2020» (онлайн, 2020 г.), международная конференция «SPIE Optics + Optoelectronics 2021» (Прага, 2021 г.), IX Всероссийская Диановская конференция по волоконной оптике (ВКВО 2023) (Пермь, 2023 г.), международная конференция «XVI International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications» (Томск, 2023 г.), XXXIV Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине 2023» (Москва, 2023 г.), International Conference Laser Optics 2024 (Санкт-Петербург, 2024 г.).

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 11 научных работах, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и 5 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus и 1 работа является патентом на изобретение, общим объемом авторского вклада 3,55 п. л.

Личный вклад автора заключается в самостоятельном выполнении теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая написание оригинальной математической модели, методик проведения экспериментальных исследований. Во всех случаях заимствования материалов других авторов в диссертационной работе приведены ссылки на источники исследования.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и изложена на 126 страницах машинописного текста, включая 47 рисунков, 2 таблицы и список источников исследования, содержащий 142 библиографических наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна и

практическая ценность. Приведена структура диссертации, формы апробации и реализация результатов.

Первая глава посвящена анализу факторов, ограничивающих применение ФВЛ в области частотной метрологии. Пространственные координаты таких систем можно определить исходя из формулы:

$$z = \frac{c}{2 \cdot n \cdot \gamma} \cdot f_d, \quad (1)$$

где γ – скорость перестройки [Гц/с], c – скорость света в вакууме [м/с], n – групповой показатель преломления тестируемого устройства, f_d – частота дискретизации системы [Гц]. Нестабильность лазера влияет на скорость сканирования, что приводит к ошибке в определении пространственной координаты. В стандартных рефлектометрах при сканировании диапазона 5,3 ТГц со скоростью 1,25 ТГц/с абсолютная нестабильность смещения частоты составляет около 20 Гц, что вызывает ошибку порядка 2 мм. Для измерения дисперсионных характеристик устройств размером до 1 мм необходимо, чтобы калибровочная гребёнка частот находилась в диапазоне от 1540 до 1580 нм и обеспечивала абсолютную нестабильность частоты следования не выше $1 \cdot 10^{-2}$ за 1 секунду для коррекции нелинейности смещения лазера.

Кроме того, необходимо обеспечить уровень спектральной плотности мощности (СПМ) относительного уровня шума интенсивности не выше –110 дБн/Гц, что является приемлемым уровнем нестабильности интенсивности для получения чётких калибровочных маркеров в методе СИ.

Проведенный анализ факторов, влияющих на стабильность интенсивности и частоту следования импульсов в ФВЛ, показал, что для выполнения требований, предъявляемых системами оптической рефлектометрии к частотным гребёнкам, следует обратить внимание на пассивную стабилизацию уровня шума интенсивности, так как он существенно влияет на остаточные фазовые шумы последовательности импульсов. СПМ относительного уровня шума интенсивности ФВЛ:

$$RIN(f) = S_e(f) + 2eI_{avg} + I_{avg}^2 S_{RIN}(f), \quad (2)$$

где $S_e(f)$ – мощность шума тока [$A^2/Гц$], e – одиночный электрический заряд [$A/Гц$], f – частота [$Гц$], I_{avg} – усредненное значение фототока, пропорциональное оптической мощности [A], $S_{RIN}(f)$ – СПМ шума интенсивности, вносимая, непосредственно, лазером [$дБ/Гц$]. Кроме того, величина СПМ относительного уровня шума интенсивности в ФВЛ с пассивной СМ коррелирует с величиной других шумов ФВЛ, наибольший вклад из которых вносит джиттер. Временной джиттер в лазере с СМ представляет собой отклонение огибающей импульсов в последовательности от позиций, определяемых периодом следования. В частотной области джиттер является одной из причин флуктуаций частоты повторения. Его величина в первом приближении может определяться через диффузную константу как:

$$D_T = \frac{\pi^2 \cdot \tau^2}{6 \cdot E_p} \cdot \theta \cdot \frac{2 \cdot g}{T_R} \cdot h \cdot \nu_0, \quad (3)$$

где τ – ширина импульсах [с]; E_p – энергия импульса [Дж]; θ – коэффициент избыточного спонтанного излучения; g – коэффициент усиления резонатора [дБ/м]; T_R – время обхода резонатора оптическим импульсом [с]; h – постоянная Планка [Дж/с]; ν_0 – частота [Гц].

Ненулевая внутрирезонаторная дисперсия может также являться причиной возникновения джиттера центральной частоты генерации излучения (джиттера Гордона–Хауса). СПМ джиттера Гордона–Хауса может быть определена как:

$$S_{\Delta t}^{\Gamma-X}(f) = \frac{4D^2 f_{rep}^2 D_\omega}{(2\pi f)^2 [(2\pi f)^2 + \tau_{\omega c}^{-2}]}, \quad (4)$$

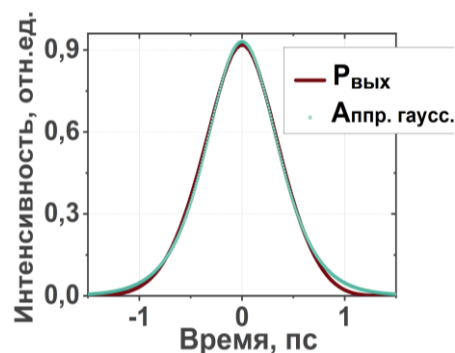
где D – половина величины внутрирезонаторной дисперсии групповых скоростей [$фс^2/м$]; f_{rep} – основная частота повторения импульсов [Гц]; D_ω – диффузная константа флуктуаций центральной частоты; $\tau_{\omega c}$ – время затухания частотного возмущения [с].

Все перечисленные выше положения и теоретические модели показывают, что для эффективного уменьшения шумовых показателей ФВЛ практические

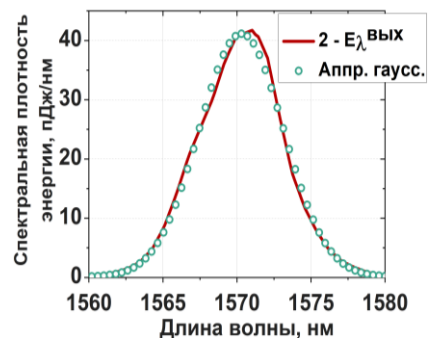
методы должны включать в себя несколько пунктов. Во-первых, уменьшение относительного уровня шума интенсивности, что приведёт к уменьшению временного джиттера, вызываемого эффектом самоусиления. Во-вторых, уменьшение полезных потерь в резонаторе для уменьшения временного джиттера, связанного с внутрирезонаторным усиленным спонтанным излучением. В-третьих, приведение к нулю полной внутрирезонаторной дисперсии для уменьшения джиттера Гордона–Хауса.

Работа вблизи нуля внутрирезонаторной дисперсии ограничивает выбор режима генерации. В данной области наиболее вероятна генерация симиларитонов, растянутых импульсов или групп связанных солитонов (ГСС). При стабилизации амплитудно-частотных характеристик выходного излучения ФВЛ важно учитывать режим генерации, так как каждый из них влияет на стабильность характеристик. Анализ источников показал, что режимы растянутых импульсов и ГСС наиболее перспективны для стабилизации интенсивности и частоты импульсов. Из-за недостатка данных о стабильности режима ГСС необходимо провести математическое моделирование процесса генерации этих режимов в резонаторе ФВЛ.

Во **второй главе** была разработана математическая модель генерации фемтосекундных импульсов в волоконном кольцевом эрбиевом лазере с высоконелинейным резонатором. Показано, что в резонаторе развиваются как растянутые импульсы, так и ГСС. Численное моделирование выявило несколько устойчивых решений нелинейных уравнений Шрёдингера при разных уровнях мощности входных сигналов. В модели была реализована генерация растянутых импульсов длительностью 200 фс, характеристики которой представлены на Рисунке 1.



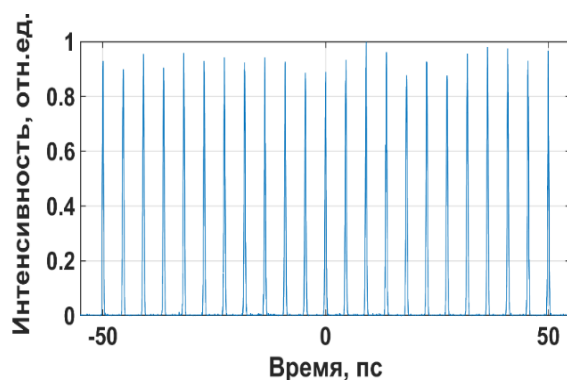
а)



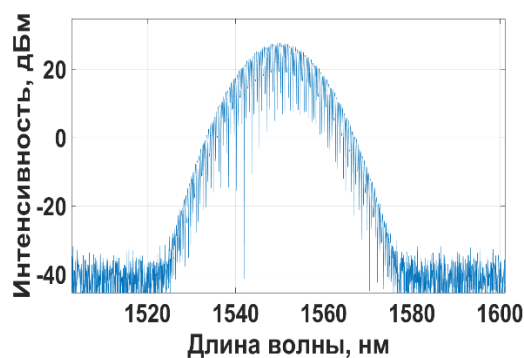
б)

Рисунок 1. Форма выходного поля фемтосекундного импульса после 100 обходов резонатора лазерным излучением во временной (а) и в спектральной (б) областях.

Кроме того, при изменении фазового соотношения взаимодействующих компонент поля в модели наблюдалась генерация ГСС с длительностью импульсов порядка 267 фс (см. Рисунок 2).



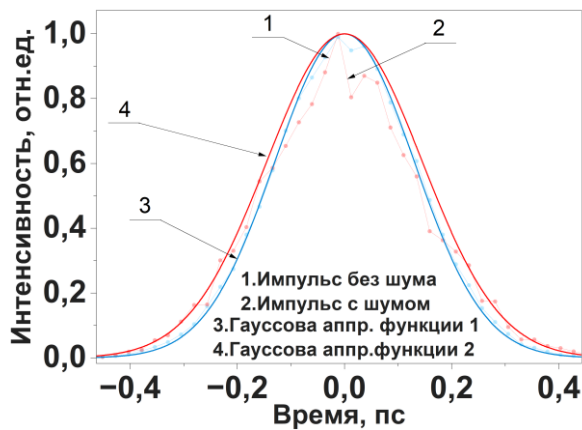
а)



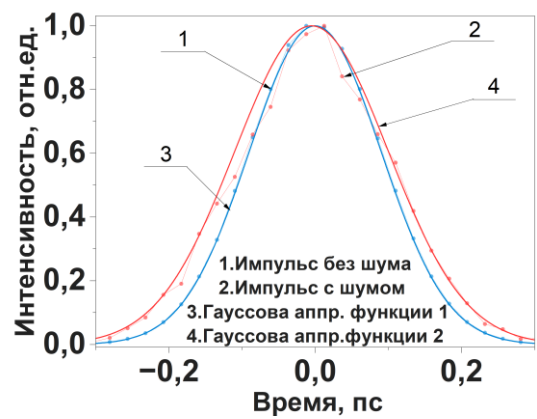
б)

Рисунок 2. Форма выходного поля ГСС, после 100 обходов резонатора лазерным излучением во временной (а) и в спектральной (б) областях

При добавлении шумового фактора в модель режим ГСС показал лучшую устойчивость (см. Рисунок 3). Стабильное решение для растянутых импульсов формировалось за 20 обходов, а для ГСС — за 33 обхода. Исследование ГСС показало, что этот режим генерации наиболее устойчив к внешним шумам и сохраняет свою четкую структуру даже при воздействии наведенных шумов, что свидетельствует о высокой кратковременной стабильности режима генерации.



а)



б)

Рисунок 3. Отклонение длительности импульса от исходной при добавлении шумового фактора для ГСС (а) и для растянутого импульса (б)

В **третьей главе** были разработаны методики и измерительные стенды для измерения амплитудно-частотных характеристик эрбиевых ФВЛ и их стабильности. К исследуемым характеристикам стабильности относились: СПМ относительного уровня шума интенсивности, отношение сигнал/шум и девиация Аллана частоты следования. В заключительных разделах главы показаны результаты экспериментальных исследований эрбиевых ФВЛ. Функциональная схема разработанного ФВЛ представлена на Рисунке 4.

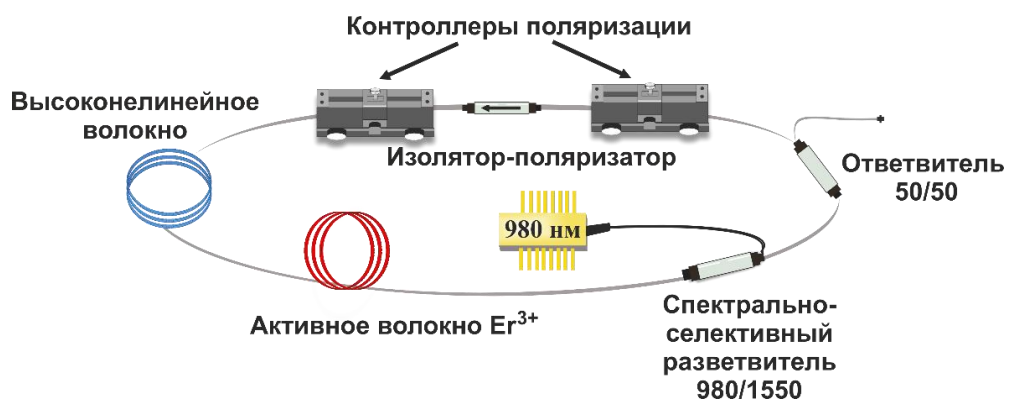
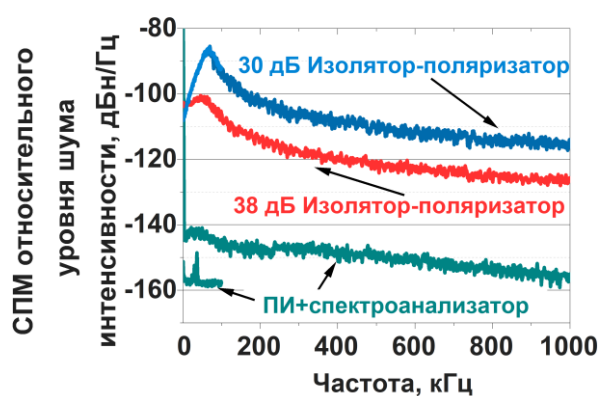


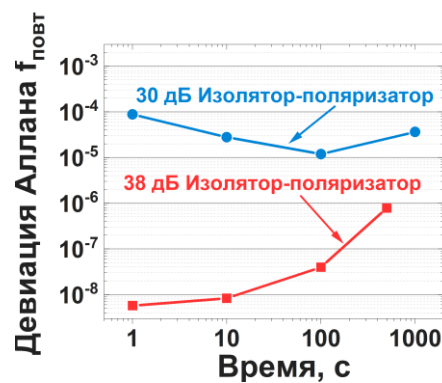
Рисунок 4. Функциональная схема экспериментальной установки фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера с высоконелинейным волокном в составе резонатора

Поскольку математическое моделирование не подтверждает напрямую стабильность режимов генерации по интенсивности и частоте импульсов, было

проведено соответствующее экспериментальное исследование. Разработанный волоконный кольцевой резонатор состоял из 3,6 м эрбиевого волокна, 1,53 м высоконелинейного германоусиликатного волокна и 11,5 м стандартного телекоммуникационного волокна для компенсации дисперсии. В результате был получен режим генерации растянутых импульсов, соответствующий моделированию. Для изучения влияния механизма синхронизации мод на стабильность амплитудно-частотных характеристик генерации был проведён эксперимент по измерению стабильности с изоляторами-поляризаторами с коэффициентами экстинкции 30 и 38 дБ. Изолятор-поляризатор являлся компонентом резонатора и обеспечивал однонаправленный режим генерации, а также дискриминацию поляризационной компоненты. Контроллеры поляризации задавали фазовый сдвиг, что позволяло выделить линейно поляризованную часть импульса, в то время как ортогональные компоненты ослаблялись изолятором-поляризатором. Девиация Аллана частоты следования импульсов в случае использования изолятора-поляризатора с коэффициентом экстинкции 38 дБ была уменьшена более чем в 10^4 раз до $5,75 \cdot 10^{-9}$ на интервале 1 с, что соответствует абсолютной нестабильности частоты следования импульсов порядка $6,5 \cdot 10^{-2}$ Гц/с. СПМ относительного уровня шума интенсивности не превышает -110 дБн/Гц.



а)



б)

Рисунок 5. Шумовые характеристики разработанного ФВЛ в режиме генерации растянутых импульсов: (а) СПМ относительного уровня шума для двух модификаций резонатора; (б) девиация Аллана частоты следования импульсов для двух модификаций резонатора

Следующим шагом к улучшению стабильности амплитудно-частотных характеристик генерации являлся переход к режиму ГСС. Режим генерации ГСС был установлен при изменении настроек контроллеров поляризации. Для определения влияния мощности накачки на формирование ГСС она изменялась от 377 до 160 мВт, что приводило к последовательному и обратимому изменению числа связанных импульсов.

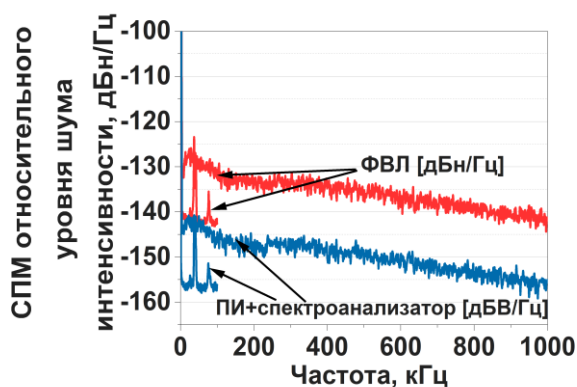


Рисунок 6. СПМ относительного уровня шума интенсивности разработанного ФВЛ в режиме генерации ГСС

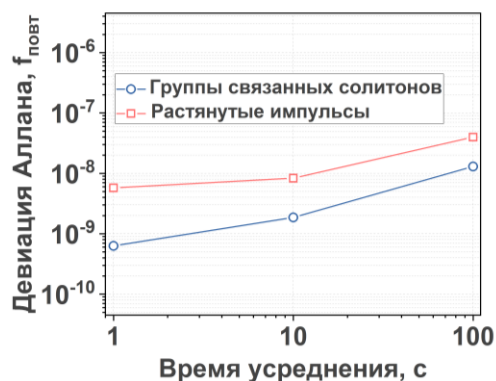


Рисунок 7. Результаты измерения девиации Аллана частоты следования за 16 часов

Для определения кратковременной стабильности генерации ГСС был измерен СПМ относительного уровня шума лазера в диапазоне от 30 Гц до 1 МГц (см. Рисунок 6). Значение СПМ относительного уровня шума для режима ГСС на частотах до 1 МГц было снижено более чем на 15 дБ, составив менее -125 дБн/Гц. Для оценки долговременной стабильности генерации ГСС была измерена девиация Аллана частоты следования импульсов, результаты представлены на Рисунке 7. Величина девиации частоты следования составила порядка $6,2 \cdot 10^{-10}$ на 1 с, что близко к пределу нестабильности кварцевого генератора в частотомере и определяется температурным дрейфом на интервале от 1 до 100 секунд. Это соответствует абсолютному значению нестабильности частоты следования импульсов порядка $7,0 \cdot 10^{-3}$ Гц, что в соответствии с формулой (1) является приемлемой величиной для разрабатываемой системы. Таким образом,

использование разработанного ФВЛ в калибровочном канале системы рефлектометра частотной области позволит снизить ошибку определения пространственной координаты тестируемого устройства более чем в 25 раз. На Рисунке 8 представлено сравнение величин ошибок в определении пространственной координаты в стандартных системах для рефлектометрии частотной области (функция 1) и для случая стабилизации системы по частотной гребёнке (функция 2).

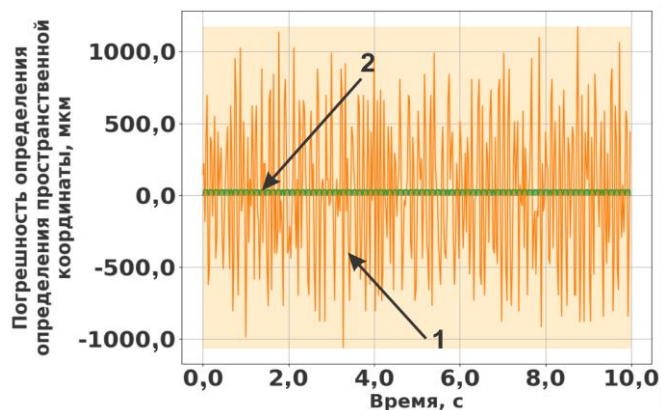


Рисунок 8. Ошибка в определении пространственной координаты в стандартных системах рефлектометров частотной области и для случая стабилизации по частотной гребёнке

Проведенное численное исследование подтвердило перспективность использования оптических частотных гребенок на основе фемтосекундных лазеров с режимом генерации ГСС в системах рефлектометров частотной области для решения задачи увеличения точности определения координат.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе:

1. Разработана математическая модель на основе связанных нелинейных уравнений Шрёдингера, впервые решенного для ФВЛ с высоконелинейным волокном в составе резонатора. Результаты численного моделирования позволили разработать методику расчёта основных параметров резонатора ФВЛ, обеспечивающую рациональный выбор компонентной базы для реализации экспериментального стенда.

2. Создан экспериментальный образец эрбиевого ФВЛ с СМ на основе НЭП, работающий в режиме генерации ГСС со СПМ относительного уровня шума, не превышающей значение -125 дБн/Гц и девиацией Аллана частоты следования $3,5 \cdot 10^{-10}$ на интервале 1 с.
3. Экспериментально установлено, что увеличение коэффициента экстинкции между поляризационными компонентами в изоляторе-поляризаторе позволяет снизить значение СПМ относительного уровня шума на 16 дБ при уменьшении девиации Аллана частоты следования импульсов в $1 \cdot 10^4$ раз на временном интервале усреднения равном 1 с.
4. Показано, что переход в режим генерации ГСС позволил увеличить стабильность частоты следования импульсов более чем в 11 раз по сравнению с режимом генерации растянутых импульсов в том же ФВЛ.
5. Впервые экспериментально продемонстрирован метод управления количеством связанных солитонов в диапазоне между 7 и 18 импульсами без изменения фазового соотношения между ними посредством изменения мощности накачки.
6. Численно показано, что при использовании в калибровочном канале системы рефлектометра частотной области генератора частотных гребёнок на основе разработанного ФВЛ ошибка определения пространственной координаты уменьшается более чем в 25 раз.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Исследование стабильности выходных характеристик полностью волоконных кольцевых эрбиевых лазеров ультракоротких импульсов /И.О. Орехов [и др.]// Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2017. № 4 (115). С. 4– 16. (1,5 п.л./0,4 п.л.)
2. Синхронизация мод в волоконном эрбиевом лазере на основе высокоплотных упорядоченных одностенных углеродных нанотрубок /И.О. Орехов [и др.]// Фотон-экспресс. 2017. № 6 (142). С. 23– 24. (0,23 п.л./0,08 п.л.)

3. Генерация связанных солитонов в волоконном лазере с синхронизацией мод на основе нелинейной эволюции поляризации в высоконелинейном резонаторе /И.О. Орехов [и др.]// Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 258– 259. (0,23 п.л./0,08 п.л.)
4. Орехов, И.О. Исследование распространения связанных солитонов, генерируемых в эрбиевом волоконном лазере, в стандартном телекоммуникационном волокне SMF-28 / И.О. Орехов [и др.]// Фотон-экспресс. 2023. № 6 (190). С. 425– 426. (0,23 п.л./0,08 п.л.)
5. Моделирование генерации ультракоротких импульсов в полностью волоконном кольцевом эрбиевом лазере с высоконелинейным резонатором /И.О. Орехов [и др.]// Оптический журнал, 2020. Т. 87., № 3. С. 56– 65. (1,16 п.л./0,4 п.л.)
6. Properties of scalable chirped-pulse optical comb in erbium-doped ultrafast all-fiber ring laser /I.O. Orekhov [et al.]// Fibers. 2021. №9(6). P. 1– 7. (0,81 п.л./ 0,4 п.л.)
7. Analysis of the passive stabilization methods of optical frequency comb in ultrashort-pulse erbium-doped fiber lasers /I.O. Orekhov [et al.]// Fibers. 2022. № 10(88). P. 1– 45 (5,2 п.л./1,3 п.л.)
8. Multibound soliton formation in an erbium-doped ring laser with a highly nonlinear resonator/ I.O. Orekhov [et al.]// IEEE Photonics Technology Letters. 2020. Vol. 32, № 1. P. 43– 46. (0,46 п.л./0,2 п.л.)
9. High-energy ultrashort-pulse all-fiber erbium-doped ring laser with improved free-running performance/ I.O. Orekhov [et al.]// Journal of the Optical Society of America B. 2018. Vol.35, № 8. P. 2010– 2014. (0,58 п.л./0,12 п.л.)
10. Soliton molecules order control and their propagation features in an anomalous dispersion optical fiber / I.O. Orekhov [et al.]// Optics & Laser Technology. 2024. Vol.171. P. 1–7. (0,81 п.л./0,4 п.л.)
11. Патент № 2764384 С1 Российская Федерация, G02F 1/065 (2006.01). Способ управления количеством связанных солитонов в фемтосекундном волоконном лазере: № 2020139886: заявл. 03.12.2020: опубл. 17.01.2022 / Орехов И.О., Дворецкий Д.А., Сазонкин С.Г.; заявитель Орехов И.О. –12 с. (1,39 п.л./1 п.л.).