

На правах рукописи
УДК 621.373.8



САЗОНКИН Станислав Григорьевич

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ
АМПЛИТУДНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА ФЕМТОСЕКУНДНЫХ
ИМПУЛЬСОВ В СОСТАВЕ ОПТИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ
ЧАСТОТЫ**

Специальность 05.11.07 –
«Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

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: **Карасик Валерий Ефимович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Тихомиров Сергей Владимирович**,
доктор технических наук, заслуженный метролог,
ведущий научный сотрудник Всероссийского
научно-исследовательского института оптико-
физических измерений

Мелькумов Михаил Александрович,
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией волоконных лазеров и
усилителей Научного центра волоконной оптики РАН

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО)

Защита состоится «29» мая 2019 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в 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>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просьба направлять по адресу: г.Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «___» 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.

Д.А. Семеренко



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время быстрыми темпами развиваются навигационные системы и системы глобального позиционирования (ГЛОНАСС, GPS и др.). Одной из ключевых задач, направленных на дальнейшее совершенствование их технических параметров, является повышение точностных и эксплуатационных характеристик задающих генераторов частоты. Перспективный путь решения данной задачи – использование малогабаритных, устойчивых к внешним, воздействиям высокостабильных задающих генераторов на основе оптических стандартов частоты. Применение оптического стандарта частоты требует использования делителя частоты, который необходим для преобразования высокочастотного оптического сигнала от стандарта частоты в радиочастотную область спектра, используемую бортовой электроникой. В то же время делитель частоты должен обладать высокой стабильностью для сохранения относительной стабильности частоты высокостабильного оптического стандарта. Перспективы решения этих задач связаны с использованием в составе делителя частоты волоконных лазеров фемтосекундных импульсов (ЛФИ), обладающих высокой пиковой мощностью излучения и имеющих оптический спектр, который представляет собой гребенку оптических частот.

Основным требованием к волоконным ЛФИ, используемым в оптическом делителе частоты, является стабильность амплитудных и временных характеристик выходного излучения. Стабильность частоты повторения импульсов ЛФИ напрямую влияет на точность преобразования высокочастотного оптического сигнала от стандарта частоты. Именно по этим причинам ЛФИ является ключевым элементом делителя частоты, от стабильности характеристик излучения которого зависит стабильность работы делителя частоты в целом.

Существуют как пассивные, так и активные методы стабилизации амплитудных и временных характеристик выходного излучения волоконных ЛФИ. Активные методы стабилизации используют системы с обратной связью, что позволяет добиться лучших выходных параметров по сравнению с пассивными методами. Однако применение систем с обратной связью существенно повышает затраты на реализацию таких источников лазерного излучения. К пассивным методам стабилизации относятся методы, связанные с изолированием резонатора от влияния внешней среды, в частности, с использованием систем термостабилизации и защиты от вибраций. Также к этим методам стабилизации можно отнести формирование в резонаторе лазера таких режимов генерации фемтосекундных импульсов (ФИ), которые менее подвержены влиянию шумовых факторов.

По данной проблеме ведутся работы как в нашей стране, так и за рубежом. Известны работы групп из Национального института стандартов и технологий (США), Института лазерной физики СО РАН, Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, которые ведутся под руководством С. Диддамса, С.Н. Багаева, М.А. Губина. Однако в этих работах в основном исследуются вопросы, связанные с использованием активных систем стабилизации выходных характеристик излучения волоконных ЛФИ. В то же время вопросы оценки влияния режимов генерации волоконного ЛФИ и используемых в его резонаторе про-

светляющихся поглотителей на стабильность амплитудных и временных характеристик выходного излучения исследованы недостаточно. В этой связи работа, посвященная методам повышения стабильности амплитудных и временных характеристик излучения лазеров фемтосекундных импульсов является актуальной.

Целью диссертационной работы является разработка методов повышения стабильности амплитудных и временных характеристик излучения волоконного лазера фемтосекундных импульсов для использования в делителе частоты оптического стандарта частоты.

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

- проведён анализ режимов генерации в волоконных ЛФИ с целью определения их влияния на стабильность амплитудных и временных характеристик генерируемого излучения и разработана методика идентификации режимов генерации в волоконных ЛФИ;
- исследованы методы синхронизации мод в волоконных ЛФИ с целью определения их влияния на стабильность амплитудных и временных характеристик генерируемого излучения;
- разработан метод исследования времени релаксации просветляющихся поглотителей на основе плёнок, в том числе содержащих углеродные наноструктуры;
- обоснована схема волоконного ЛФИ с гибридной синхронизацией мод, работающего в режиме генерации симиларитонов, с использованием просветляющегося поглотителя на основе одностенных углеродных нанотрубок, обеспечивающая требуемое повышение стабильности амплитудных и временных характеристик;
- создан экспериментальный образец волоконного ЛФИ с гибридной синхронизацией мод, работающий в режиме генерации симиларитонов, и проведены экспериментальные исследования временных и амплитудных характеристик его выходного излучения.

Объектом исследования является волоконный эрбьевый ЛФИ с гибридной синхронизацией мод, работающий в режиме генерации симиларитонов, полностью состоящий из оптоволоконных элементов, для использования в делителе частоты оптического стандарта частоты.

Предметом исследования являются пути повышения стабильности амплитуды и частоты повторения импульсов выходного излучения волоконного эрбьевого ЛФИ, работающего в режиме генерации симиларитонов, полностью состоящего из оптоволоконных элементов.

Методы исследований При решении теоретических и прикладных задач были использованы: методы теории вероятности и математической статистики, методы математического моделирования, методы измерения амплитудных и временных характеристик излучения ЛФИ.

Научная новизна результатов заключается в том, что:

- показано, что использование режима генерации симиларитнов позволяет снизить значение девиации Аллана частоты повторения импульсов лазера до 7 раз по сравнению с ближайшими аналогами;
- установлено, что разработанный метод повышения стабильности амплитудных характеристик излучения, базирующийся на применении гибридной синхронизации мод с одновременным использованием просветляющихся поглотителей на основе одностенных углеродных нанотрубок и нелинейной эволюции поляризации в волоконном световоде обеспечивает повышение стабильности амплитудных характеристик излучения эрбииевого волоконного ЛФИ за счет снижения уровня спектральной плотности мощности шума до значения < -120 дБн/Гц;
- показано, что время релаксации просветляющегося поглотителя может быть измерено с помощью метода, основанного на регистрации длительности импульсов волоконного ЛФИ, работающего в режиме генерации солитонов.

Положения, выносимые на защиту:

- метод повышения стабильности амплитудных характеристик излучения лазера фемтосекундных импульсов, базирующийся на применении гибридной синхронизации мод с одновременным использованием просветляющихся поглотителей на основе одностенных углеродных нанотрубок и нелинейной эволюции поляризации в волоконном световоде, обеспечивает повышение стабильности амплитудных характеристик выходного излучения эрбииевого волоконного лазера фемтосекундных импульсов;
- использование режима генерации симиларитонов в эрбииевом волоконном лазере фемтосекундных импульсов позволяет повысить стабильность временных характеристик выходного излучения.

Практическая ценность:

- разработан и реализован действующий экспериментальный образец волоконного эрбииевого ЛФИ для использования в составе оптического делителя частоты, работающий в режиме генерации симиларитонов, с минимальной длительностью импульса 93 фс и энергией импульса 0,3 нДж;
- разработан и реализован волоконный эрбииевый усилитель, повышающий пиковую мощность в 25 раз и уменьшающий длительность импульса до 29 фс, который позволяет использовать разработанный эрбииевый ЛФИ в метрологии, терагерцовой спектроскопии и медицине;
- разработана методика идентификации режимов генерации в волоконных лазерах фемтосекундных импульсов;
- разработаны метод и аппаратура для исследования модуляционных и временных характеристик просветляющихся поглотителей на основе плёнок, в том числе содержащих углеродные наноструктуры.

Реализация и внедрение результатов исследований

Результаты и материалы диссертационной работы использованы в учебном процессе на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы» (РЛ-2) МГТУ им. Н.Э. Баумана. Реализация результатов работы подтверждается соответствующим актом внедрения.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались на 13 научно-технических конференциях и симпозиумах: XXV – XXVII международных конференциях «Лазеры в науке, технике, медицине» (Туапсе, 2014–2016); международных конференциях «Laser Optics» (Санкт-Петербург, 2014, 2016); международной конференции «Photonics Prague» (Прага, 2014); международной конференции «The 3rd Russia–Japan–USA Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies» (Буффало, 2014); международной конференции «Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum» (Денвер, 2015); международной конференции «Frontiers in Optics» (Сан-Хосе, 2015); международной конференции «Advanced Solid State Lasers» (Берлин, 2015); международной конференции «Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)» (Шанхай, 2016); 42-ой международной конференции «European Conference and Exhibition on Optical Communications» (Дюссельдорф, 2016); международной конференции «Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe and the European Quantum Electronics Conference» (Мюнхен, 2017).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 публикациях, из них 8 опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, из которых 7 в МБД Scopus и 6 в МБД Web of Science.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и изложена на 149 страницах машинописного текста, включая 66 рисунков, 2 таблицы и список литературы, содержащий 151 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность. Также сформулированы защищаемые положения и приведена структура диссертации.

В **первой главе** проведены анализ основных шумовых характеристик волоконных ЛФИ и исследование их влияния на амплитудные и временные характеристики выходного излучения. К выделенным шумовым характеристикам относятся: джиттер, относительный уровень шума (RIN), шумы гребёнки частот. Шумом интенсивности являются колебания средней мощности импульсов в течение определенного периода времени измерения и характеризующие среднюю стабильность мощности. Шум интенсивности в ЛФИ, так же, как и для других источников лазерного излучения, количественно определяется через RIN. Шум интенсивности в ЛФИ обусловлен как квантовыми источниками, такими как усиленное спонтанное излучение и вакуумный шум, так и внешними источниками шума, такими как, например, шум интенсивности лазера накачки, в том числе шум источника питания лазера накачки. На значение RIN в волоконных ЛФИ влияют: режим генерации и механизм формирования импульсов, суммарная дисперсия групповых скоростей (ДГС) элементов резонатора, спектральные

фильтры в резонаторе. Экспериментальными исследованиями выявлено, что минимальное значение RIN наблюдается при суммарной ДГС элементов резонатора равной нулю. Спектральные фильтры снижают шумы интенсивности лазера, однако при этом увеличивается длительность импульса и падает пиковая мощность. Минимальный уровень шума устанавливается флюктуациями вакуумного шума, спектральная плотность мощности которого определяется выражением:

$$S_{RIN}(f) = \frac{2h\nu_c}{P_{avg}}, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка; ν_c – центральная частота несущей; P_{avg} – средняя выходная мощность ЛФИ. Следовательно, большая выходная мощность лазера обеспечивает меньший уровень шумов.

Основным параметром, характеризующим стабильность временных характеристик выходного излучения лазера, является джиттер. Джиттер – временное отклонение положения огибающей импульса от его идеального положения, определяемого периодом обхода резонатора импульсом. Часто джиттер определяют как интегральную характеристику фазовых шумов всех частотных компонент распространяющегося импульса. Спектральная плотность мощности джиттера и фазовых шумов частоты повторения импульсов (f_{rep}) и его гармоник (nf_{rep}) идентичны, в предположении отсутствия фазового шума при оптико-электронном преобразовании сигнала приемником излучения. Следует отметить, что кроме усиления спонтанного излучения, на джиттер в значительной степени влияют акустический шум и RIN. Акустический шум наблюдается в диапазоне от десятков герц до 1 кГц. Акустическое экранирование корпуса волоконного лазера может значительно уменьшить воздействие акустического шума. Использование быстрого просветляющегося поглотителя не влияет на джиттер. Наличие спектральных фильтров в резонаторе снижает значение джиттера, так же, как и RIN, однако приводит к увеличению длительности импульса и уменьшению мощности. Значение джиттера можно выразить с помощью формулы:

$$J^2 = \frac{2h\nu}{E^2}(g-1) \left[\frac{4D_2^2}{T_R^2} \tau_g^2 C I_\omega + I_t \right] \frac{T}{T_R}, \quad (2)$$

где E – энергия импульса; T_R – время прохода импульсом резонатора; D_2 – суммарная ДГС элементов резонатора; T – время измерения; $I_\omega = \int t^2 E(\omega) d\omega$ – интегральная спектральная плотность энергии импульса; $I_t = \int t^2 E(t) dt$ – интегральная энергия импульса по времени; τ_g – постоянная времени, которая учитывает изменения частоты из-за ширины полосы усиления лазерной среды и равная: $\tau_g \approx (T_R/g)(\Delta\Omega_g/\Delta\Omega_p)^2$; $\Delta\Omega_g$ и $\Delta\Omega_p$ – ширина спектра на полуысоте активной среды и импульса, соответственно; C – коэффициент, учитывающий чирп импульса. Как видно из формулы 2, для уменьшения значения джиттера необходимо: свести суммарную ДГС элементов резонатора к нулю, максимально увеличить энергию импульса и увеличить длину резонатора.

Оптический спектр излучения ЛФИ представляет собой синхронизированную по фазе гребёнку частот, состоящую из дельта-функций с лоренцевым распределением интенсивности с постоянным межмодовым расстоянием, которое

равно частоте повторения импульсов $\delta\omega = 2\pi/T_R$. Шумы гребёнки оптических частот включают в себя как «дрожание» частоты самих линий гребёнки, так и шум частоты отстройки f_{ceo} , влияющий на положение всей гребёнки целиком. На ширину одной линии гребёнки в меньшей степени влияет усиление спонтанного шума, в то время как преобладает влияние технических шумов. В основном это RIN лазера накачки и шумы связанные с изменением длины резонатора ЛФИ. Гребёнку оптических частот спектра излучения ЛФИ можно описать выражением:

$$\tilde{A}(\nu) = \frac{|\tilde{a}(\nu - \nu_c)|^2}{2\pi T_R^2} \sum_n \frac{2\Delta\nu_n}{(\nu - \nu_n)^2 + \Delta\nu_n^2}, \quad (3)$$

где $\tilde{a}(\nu)$ – Фурье-образ огибающей функции $a(t)$; ν_n – частота n -ой составляющей (без шума) $\nu_n = f_{ceo} + n f_{rep}$; $\Delta\nu_n$ – ширина одной линии гребёнки.

Основными требованиями, предъявляемыми к ЛФИ для достижения стабильности амплитудных и временных характеристик, являются: нулевая суммарная ДГС элементов резонатора, минимальная длительность импульса, максимальная ширина огибающей оптического спектра излучения и максимальная энергия импульса. Для определения оптимального режима генерации в волоконном ЛФИ, удовлетворяющего данным требованиям и позволяющего получить необходимые характеристики выходного излучения, был проведен анализ существующих режимов генерации в ЛФИ. Режимы генерации солитонов и диссипативных солитонов не являются оптимальными, так как реализуются при больших значениях отрицательной и положительной суммарной ДГС резонатора соответственно. Режим генерации растянутых импульсов имеет теоретическое ограничение по энергии импульса. Среди существующих режимов генерации, реализуемых вблизи нуля суммарной ДГС элементов резонатора, предпочтительно использовать режим генерации симиларитонов. Симиларитон – это специфический тип колебаний, который является одним из решений уравнения распространения, имеет параболическую форму импульса и огибающей оптического спектра, и, в отличие от солитона, не обладает теоретическим ограничением по энергии импульса. Реализация вблизи нуля суммарной ДГС и высокая энергия импульса позволяют потенциально улучшить характеристики стабильности выходного излучения волоконного ЛФИ.

Поскольку только по конструктивным параметрам резонатора невозможно с абсолютной точностью идентифицировать режим генерации в волоконном ЛФИ, определение режима генерации становится нетривиальной задачей. Идентификация режима генерации симиларитонов в волоконных ЛФИ, осуществлялась с помощью разработанной методики, основанной на расчёте суммарной ДГС элементов резонатора лазера и анализа формы огибающей оптического спектра ЛФИ. При большом отрицательном значении суммарной ДГС элементов резонатора возможен режим генерации солитонов, для которого типична форма огибающей спектра в виде гиперболического секанса. В резонаторе с большим положительным значением суммарной ДГС элементов резонатора наблюдается режим генерации диссипативных солитонов. Режим генерации симиларитонов

реализуется вблизи нуля суммарной ДГС элементов резонатора, и его необходимо отличать от режима генерации растянутых импульсов, также реализующегося в области нуля суммарной ДГС элементов резонатора. Для режима генерации симиларитонов характерна параболическая форма огибающей оптического спектра выходного излучения лазера, в то время как для режима генерации растянутых импульсов характерна гауссова форма огибающей оптического спектра. Также, при том же значении суммарной ДГС элементов резонатора, в котором реализуется режим генерации симиларитонов, может быть реализован режим генерации диссипативных солитонов. Однако для данного режима характерна прямоугольная форма огибающей оптического спектра с типичными для него пиками на краях. При этом важной задачей для реализации режима генерации симиларитонов является выбор оптимального механизма синхронизации мод.

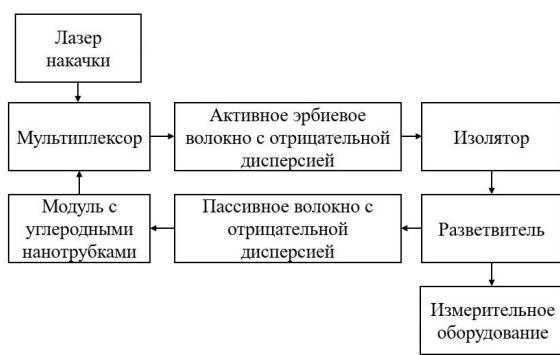
Вторая глава диссертации посвящена разработке метода повышения стабильности амплитудных характеристик выходного излучения, базирующегося на применении гибридной синхронизации мод с одновременным использованием просветляющихся поглотителей на основе одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и нелинейной эволюции поляризации в волоконном световоде. Просветляющиеся поглотители, как известно, обладают нелинейным пропусканием, не вносят потерь для излучения с высокой интенсивностью и не пропускают излучение с низкой интенсивностью. В работе было выделено два основных типа просветляющихся поглотителей: естественные и искусственные. К естественным просветляющимся поглотителям, которые сегодня используются в ЛФИ, относятся полупроводниковые просветляющиеся зеркала и просветляющиеся поглотители на основе углеродныхnanoструктур. Основными особенностями естественных просветляющихся поглотителей являются относительно большое время релаксации (≈ 400 фс) и низкий порог запуска синхронизации мод. Принцип работы искусственных просветляющихся поглотителей основан на использовании нелинейной эволюции поляризации. Основным преимуществом данного механизма является низкое время отклика (≈ 5 фс), однако для запуска синхронизации мод требуется относительно высокая интенсивность излучения лазера.

На базе анализа результатов проведенных исследований, в работе предложено использовать просветляющиеся поглотители на основе ОУНТ с целью уменьшения RIN в волоконных ЛФИ. Данный результат показывает перспективность использования ОУНТ в качестве просветляющегося поглотителя для организации синхронизации мод в резонаторе лазера. Однако их использование в данном качестве обладает рядом недостатков. При производстве ОУНТ нет возможности контролировать их диаметры (во многом от которых зависят их свойства). К тому же, для их использования в резонаторе лазера необходимо получить плёнки с диспергированными в них ОУНТ. В качестве матриц плёнок обычно выступают полимеры, и в этой матрице углеродные трубы могут быть распределены неравномерно, кроме того полимерные матрицы имеют низкую, по сравнению с самими трубками, лучевую стойкость. Данные факторы влияют на повторяемость свойств, производимых просветляющихся поглотителей.

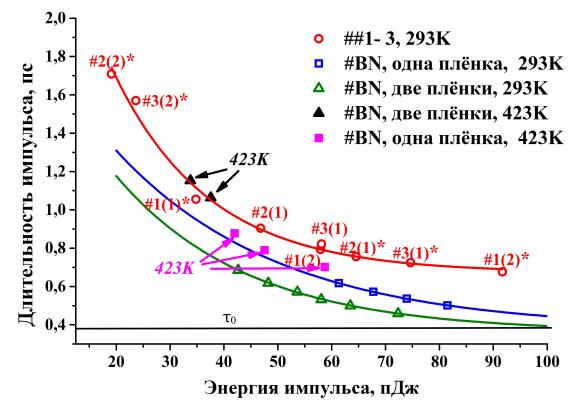
Основными параметрами просветляющихся поглотителей являются: время релаксации, глубина модуляции и непросветляющиеся потери. Для измерения

времени релаксации просветляющегося поглотителя на основе плёнок был разработан новый метод исследования. Суть метода заключается в измерении зависимости длительности импульсов от энергии импульсов в волоконном ЛФИ работающем в режиме генерации солитонов, где в качестве просветляющегося поглотителя используется только исследуемая плёнка. Выбор режима генерации солитонов связан с тем, что данный режим обладает хорошей устойчивостью генерации, легко реализуется и имеет высокую повторяемость результатов. На базе полученных данных о длительности и частоте следования импульсов и средней мощности излучения определяется зависимость длительности импульса от его энергии, которая аппроксимируется экспоненциальной функцией.

Схема установки для исследования показана на Рисунке 1,а и представляет собой волоконный кольцевой лазер, работающий в режиме генерации солитонов, с подключенным к нему измерительным оборудованием. Преимуществами данного метода по сравнению с аналогом (метод «возбуждение-зондирование») являются отсутствие в схеме измерительного стенда высокоточных узлов и необходимости в тонких юстировках стенкового оборудования при замене исследуемого образца. Ещё одним важным преимуществом является отсутствие дополнительных затрат на дорогостоящее оборудование, так как автокоррелятор и измеритель оптической мощности являются основными инструментами для исследования ЛФИ.



а)



б)

Рисунок 1. Исследования времени релаксации: а) схема волоконного кольцевого лазера, для исследования времени релаксации просветляющихся поглотителей; б) результаты измерений времени релаксации просветляющихся поглотителей на основе плёнок с ОУНТ

Результаты измерений показаны на Рисунке 1,б. Значение асимптоты экспоненциальной функции τ_0 можно интерпретировать как время релаксации просветляющегося поглотителя. В процессе измерений необходимо чтобы теоретически ограниченная длительность импульса была меньше времени релаксации исследуемого объекта и не менялась при его распространении в резонаторе. Следует отметить, что исследование времени релаксации ОУНТ при различных температурах ранее не проводилось. На данный метод подана заявка на патент на изобретение.

Исследования глубины модуляции и непросветляющихся потерь просветляющихся поглотителей на основе плёнок с ОУНТ проводились с помощью стенда,

представленного на Рисунке 2,а. Методика исследования данных модуляционных характеристик просветляющегося поглотителя на основе ОУНТ заключается в измерении и нахождении соотношения между мощностями излучения двух ветвей волоконного разветвителя.

Исследовались конфигурации с одним и двумя слоями плёнок с чистыми ОУНТ с различными концентрациями (#1 – 3) и плёнок с ОУНТ, легированными бором и азотом (#BN). По результатам измерений, показанным на Рисунке 1,б, наименьшее время релаксации было обнаружено у образца плёнок с ОУНТ #BN в конфигурации из двух плёнок. Данный факт подтверждает предположение, выдвинутое в ходе проведения теоретического анализа. На Рисунке 2,б представлены результаты измерений глубины модуляции из которых видно, что наибольшей глубиной модуляции, необходимой для устойчивого самозапуска синхронизации мод, также обладает образец из двух плёнок #BN. Данные измерения свидетельствуют о том, что наличие дефектов, вызванных легированием, не только уменьшает время релаксации, но и увеличивает глубину модуляции. Основные характеристики исследованных просветляющихся поглотителей представлены в Таблице 1. Таким образом, для использования в волоконном ЛФИ с повышенными требованиями к стабильности амплитудных и временных характеристик оптимальными являются ОУНТ #BN.

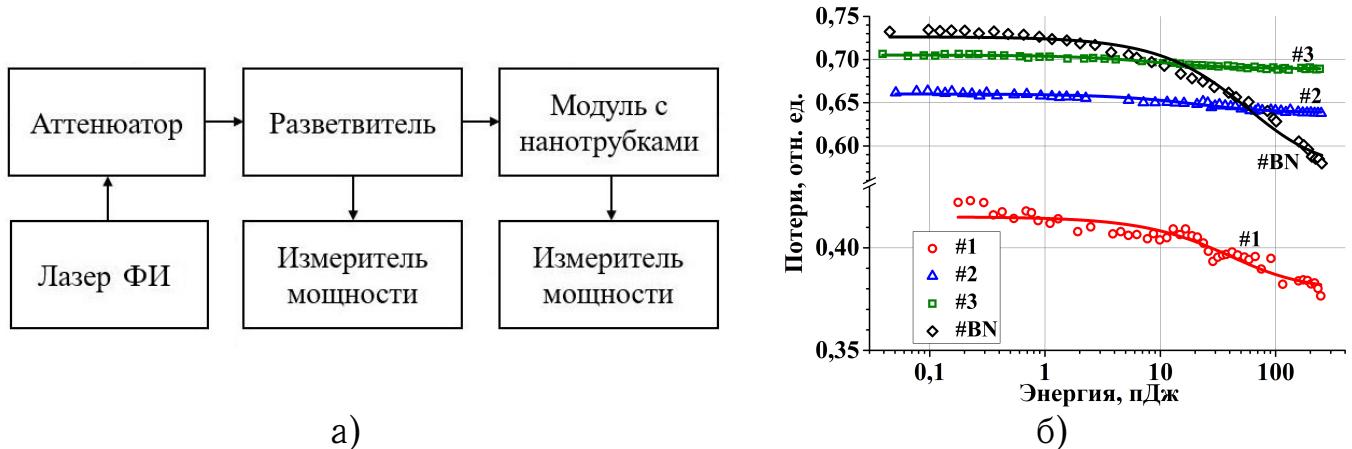


Рисунок 2. Исследования глубины модуляции просветляющихся поглотителей на основе плёнок: а) схема стенда для измерения глубины модуляции; б) результаты измерения глубины модуляции образцов из двух плёнок с ОУНТ с аппроксимациями

Именно такие ОУНТ использованы в резонаторе разрабатываемого волоконного ЛФИ. Однако основным недостатком просветляющихся поглотителей на основе ОУНТ является относительно большое время релаксации, которое не позволяет получить минимально возможную длительность импульса, поэтому в работе предложено использовать метод гибридной синхронизации мод. Данный метод заключается в одновременном использовании двух различных типов просветляющихся поглотителей. Совместное использование естественных и искусственных механизмов синхронизации мод, позволяет получить преимущества двух типов просветляющихся поглотителей, с компенсацией их недостатков. В результате использования гибридной синхронизации мод возможно реализовать:

Таблица 1.

Модуляционные характеристики четырех образов просветляющихся поглотителей на основе ОУНТ, установленные в 1 и 2 слоя

Параметр	#1(1)	#1(2)	#2(1)	#2(2)	#3(1)	#3(2)	#BN(1)	#BN(2)
$l_n s$, %	$18,4 \pm 0,5$	$37,5 \pm 0,2$	$36,6 \pm 0,3$	$63,8 \pm 0,1$	$39,9 \pm 0,2$	$68,92 \pm 0,03$	$29,4 \pm 0,6$	$56,9 \pm 0,65$
ΔT , %	$4,6 \pm 0,5$	$3,6 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,2$	$2,20 \pm 0,08$	$3,9 \pm 0,2$	$1,60 \pm 0,03$	$14,9 \pm 0,6$	$15,8 \pm 0,6$
E_{sat} , пДж	55 ± 13	23 ± 4	26 ± 6	$11,6 \pm 1,5$	30 ± 4	$5,4 \pm 0,5$	21 ± 3	33 ± 4
T_0 , %	77	58,5	60	34	56,2	29,5	55,6	27,4
F_{sat} , мкДж/см ²	62	26	29	13	34	6,1	24	37
E_p^{max} , пДж	34,8	91,7	64,6	19,1	74,7	23,7	81,5	72,3
P_{av}^{max} , мВт	2	5,3	3,7	1,1	4,3	1,4	5	4,4
τ_p^{min} , пс	1,06	0,68	0,76	1,71	0,72	1,57	0,5	0,64
P_{pump} , мВт	53	94	77,4	66,6	85,6	74,1	85	100

короткую длительность импульсов, низкий порог генерации, повышенную стабильность и устойчивую генерацию с самозапуском. В качестве искусственного просветляющегося поглотителя в работе был использован механизм нелинейной эволюции поляризации, так как его реализация в кольцевом резонаторе возможна при минимальных изменениях схемы.

Третья глава диссертации посвящена экспериментальному исследованию образца волоконного ЛФИ и подтверждению сформулированных ранее теоретических положений. Схема резонатора реализованного ЛФИ представлена на Рисунке 3,а и включает в себя: легированное эрбием оптическое волокно с положительным значением ДГС, поляризационное оптическое волокно, модуль с ОУНТ, контроллеры поляризации, волоконно-оптический изолятор, разветвитель, мультиплексор и стандартное телекоммуникационное оптическое волокно SMF-28. Накачка лазера осуществляется лазерным диодом с центральной длиной волны 980 нм с волоконным выходом.

Создание ЛФИ с повышенной стабильностью амплитудных и временных характеристик для использования в оптическом делителе частоты предполагает формирование импульсов с высокими энергетическими характеристиками, так как в этом случае удастся уменьшить влияние относительного уровня шумов. Для решения этой задачи был разработан волоконный усилитель, повышающий энергетические характеристики и уменьшающий длительность импульса. Схема реализованного ЛФИ с усилителем показана на Рисунке 3,б. Активным элементом усилителя является легированное эрбием оптическое волокно длинной 1 метр с пониженным значением положительной ДГС $\beta_2 = 6,6 \text{ пс}^2/\text{км}$ (диаметр сердцевины 3 мкм) и поглощением малого сигнала равным 43 дБ/м на длине волны 1560 нм. В качестве компрессора использовались два типа волокна – волокно с большой площадью моды (LMA) $\approx 20 \text{ мкм}$ с отрицательной ДГС $\beta_2 = -28,9 \text{ пс}^2/\text{км}$ и стандартное телекоммуникационное волокно SMF-28.

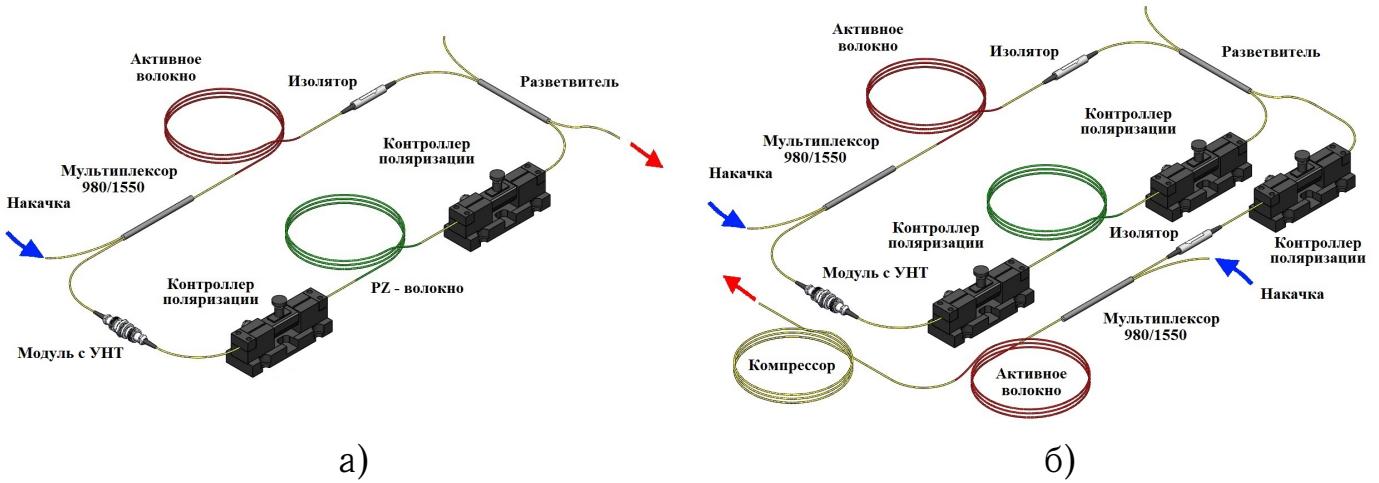


Рисунок 3. Схема разрабатываемого волоконного ЛФИ: а) без усилителя; б) с усилителем

Для подтверждения выдвинутых ранее теоретических положений разработаны стенды для экспериментальных исследований: длительности импульсов, оптического спектра излучения, относительного уровня шума, девиации Аллана и ширины линии гребёнки лазерного излучения.

Проведено исследование ширины и формы огибающей оптического спектра излучения лазера для определения режима генерации в волоконном ЛФИ. На Рисунке 4,а изображена огибающая оптического спектра разработанного волоконного ЛФИ. Она составляет порядка 52 нм по уровню -10 дБ при средней выходной мощности 11,2 мВт. На Рисунке 4,б показана огибающая оптического спектра разработанного ЛФИ при выходной мощности 6,9 мВт совместно с теоретическими приближениями в виде параболической и гауссовой формы огибающих. Используя разработанную методику идентификации режима генерации можно сделать вывод, что в ЛФИ распространяется режим генерации симиларитонов.

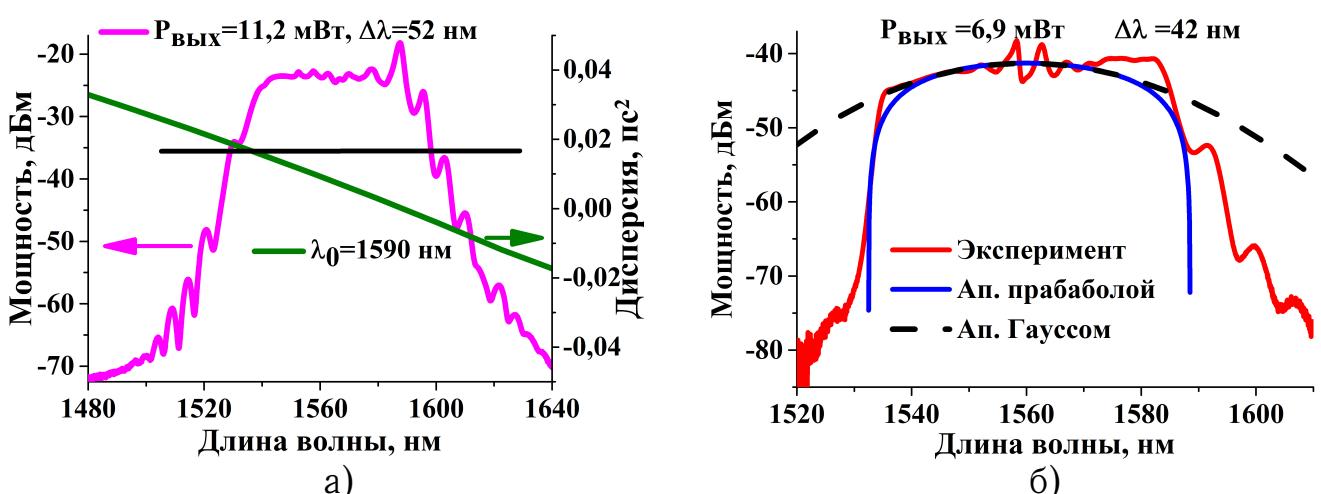
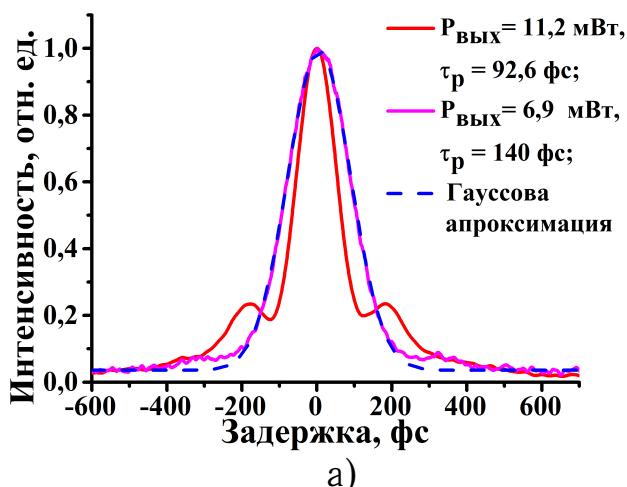
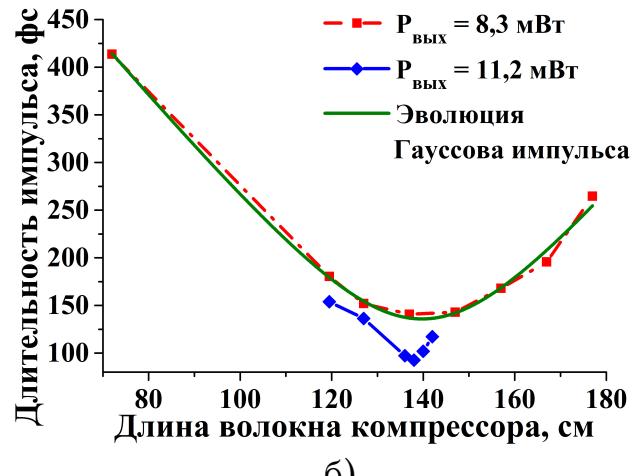


Рисунок 4. Исследование огибающей оптического спектра излучения лазера: а) при средней выходной мощности 11,2 мВт; б) при средней выходной мощности 6,9 мВт



а)



б)

Рисунок 5. Исследование длительности импульса: а) автокорреляционные функции выходного излучения при различных средних мощностях; б) зависимость длительности импульса от длины компрессора

Для подтверждения эффективности использования гибридной синхронизации мод было проведено исследование длительности импульса ЛФИ. На Рисунке 5,а показаны автокорреляционные функции выходного излучения при различных средних мощностях. При средней выходной мощности 11,2 мВт длительность импульса составила 92,6 фс после компрессии. Данный результат подтверждает выдвинутое ранее предположение о перспективности использования гибридной синхронизации мод. Зависимость длительности импульса излучения от длины выходного волокна SMF-28 (компрессора) показана на Рисунке 5,б. Оптимальная длина компрессора для лазера без усилителя составила 138 см.

Чтобы подтвердить перспективность использования ОУНТ для увеличения стабильности амплитудных характеристик выходного излучения было проведено исследование RIN. Схема измерения RIN показана на Рисунке 6,а. На Рисунке 6,б показан измеренный уровень спектральной плотности мощности шума.

Измерения RIN проводились с помощью анализатора электрического спектра SRS SR760 с диапазоном измерения от 476 мкГц до 100 кГц с динамическим диапазоном 90 дБ, типичный уровень шумов составляет $-166 \text{ дБВ/}\sqrt{\text{Гц}}$. В качестве приемника излучения использовался приемник Femto.de HCA-S-200M-IN с InGaAs фотодиодом, с диапазоном рабочих длин волн от 1000 до 1700 нм, с рабочими частотами до 200 МГц и чувствительностью $1,9 \cdot 10^4 \text{ В/Вт}$ с волоконным входом. Данное оборудование обладает всеми необходимыми характеристиками для измерения RIN с необходимой погрешностью. Уровень спектральной плотности мощности шума составил $< -120 \text{ дБн/Гц}$, что на 10 % ниже среднего уровня спектральной плотности мощности шума для эрбьевых волоконных ЛФИ. Этот результат подтверждает предположение, что использование ОУНТ увеличивает стабильность амплитудных характеристик выходного излучения.

Подтверждением перспективности использования режима генерации симиларитонов является исследование стабильности частоты повторения импульсов при помощи исследования девиации Аллана. На Рисунке 7 показан стенд для измерения девиации Аллана. Измерение частоты повторения импульсов проводилось с помощью анализатора электрического спектра SRS SR760, в качестве при-

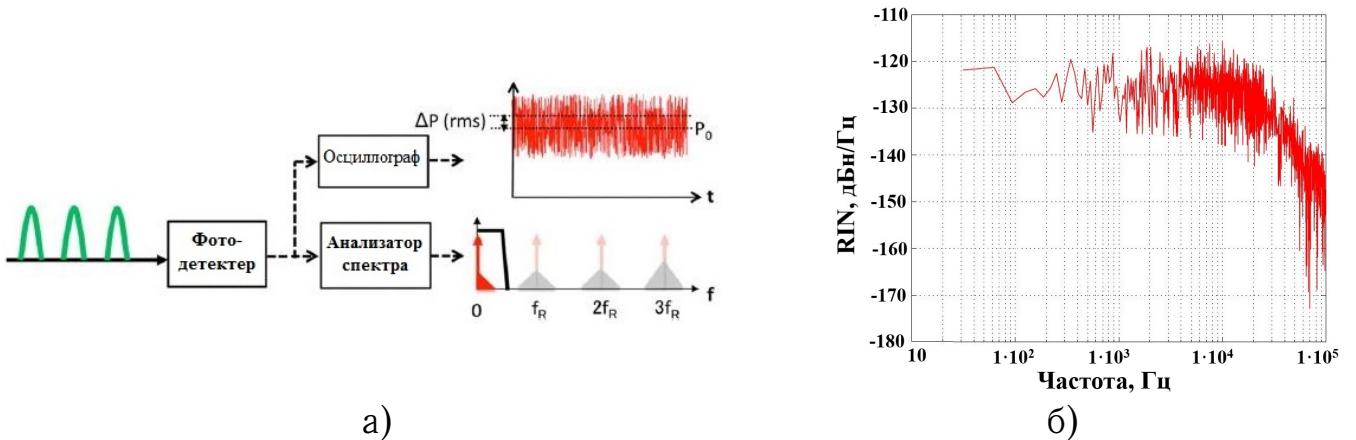


Рисунок 6. Измерения RIN волоконного эрбииевого ЛФИ: а) схема стенда для измерения RIN; б) результаты измерений RIN

емника излучения использовался приемник Femto.de HCA-S-200M-IN с InGaAs фотодиодом и волоконным входом. На основании измерений частоты повторения импульсов построен график зависимости девиации Аллана от времени усреднения. На Рисунке 8 видно, что девиация Аллана от 3 до 7 раз меньше (при различных временах усреднения), чем у аналогичных ЛФИ.



Рисунок 7. Схема стенда для измерения девиации Аллана

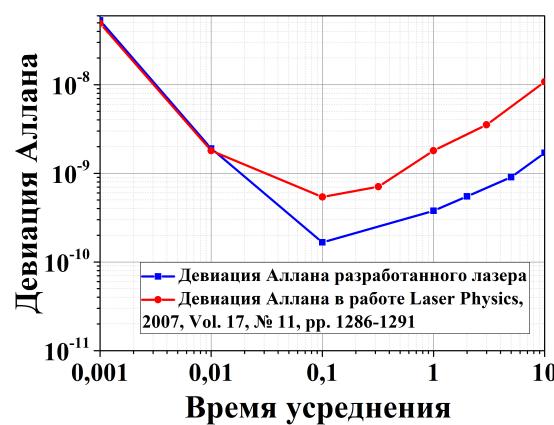
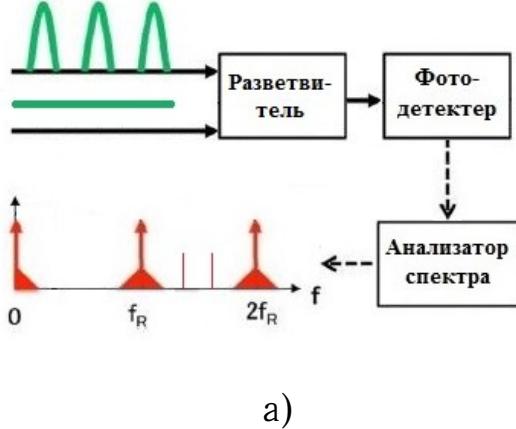


Рисунок 8. Результаты измерений девиации Аллана

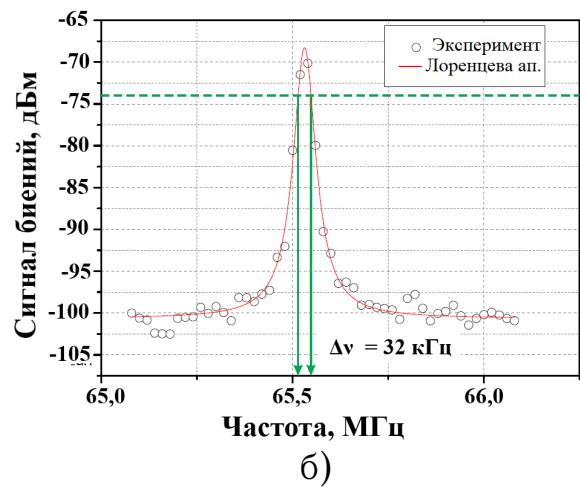
Исследование ширины линии гребёнки волоконного ЛФИ проводились для подтверждения стабильности временных характеристик выходного излучения. На Рисунке 9,а показана схема измерения ширины линии гребёнки.

Объединение сигналов от ЛФИ и узкополосного лазера происходит в волоконном разветвителе. Смешанный сигнал подается на приемник оптического излучения, который имеет рабочий диапазон частот от 0 до 200 МГц. Для измерения ширины линии гребёнки в качестве узкополосного лазера используется лазер RIO со следующими характеристиками: длина волны излучения 1550,12 нм, ширина линии спектра 2 кГц, выходная мощность 10 мВт. Для

измерения сигнала биений применялся анализатор электрического спектра SRS SR760, а в качестве приемника излучения использовался приемник Femto.de 200 MHz Photoreceiver Series HCA-S-200M-IN с InGaAs фотодиодом и волоконным входом. Чем уже линия сигнала биений, тем стабильнее временные характеристики выходного излучения. Ширина линии гребёнки после аппроксимации данных, как видно из Рисунка 9,б, составляет 32 кГц по полувысоте, что в 3 раза меньше чем ширина линии гребёнки лазера с самозапуском с использованием полупроводникового просветляющегося зеркала (D. Fehrenbacher [et al.] // CLEO: 2015, paper STh1N.1).



а)



б)

Рисунок 9. Измерение ширины линии гребёнки волоконного ЛФИ: а) схема стенда для измерения ширины линии гребёнки; б) результаты измерения ширины линии гребёнки

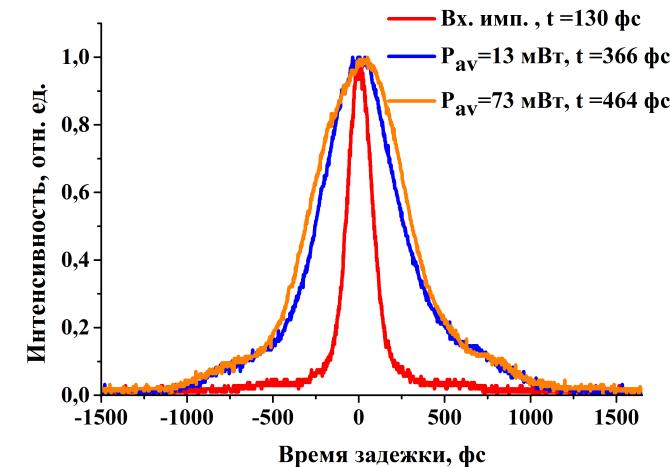
Для подтверждения возможности увеличения энергии импульса и уменьшения его длительности были проведены экспериментальные исследования разработанного волоконного лазера с усилителем.

На Рисунках 10,а и 10,б показаны характеристики выходного излучения разработанного волоконного ЛФИ с усилителем без компрессии. Наилучшие результаты были получены при сжатии импульса волокном с повышенной площадью моды. Результаты измерения выходных характеристик импульсов после компрессии при различных средних мощностях показаны на Рисунках 10,в и 10,г. При помощи усилителя с компрессором удалось поднять пиковую мощность в 25 раз, энергию импульса до уровня до 2,6 нДж, а также уменьшить длительность импульса до 29 фемтосекунд. Эти показатели на сегодняшний день являются одними из лучших мировых результатов для лазеров с полностью волоконной схемой. Данное экспериментальное исследование подтвердило перспективность использования усилителя для увеличения энергии и уменьшения длительности импульсов.

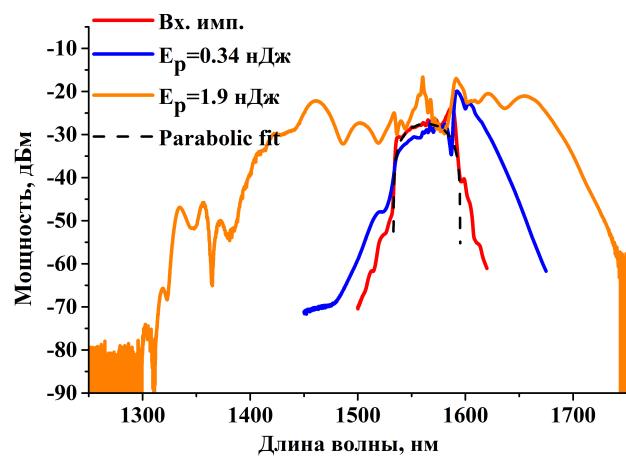
В **общих выводах** сформулированы основные результаты, полученные в ходе проведения работы.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

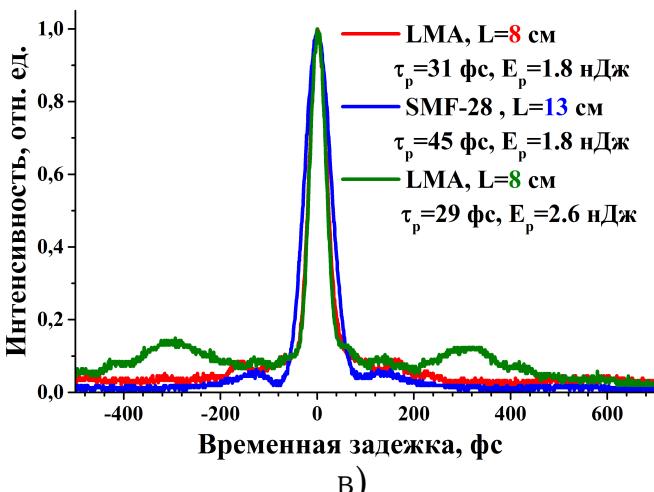
- Разработан метод повышения стабильности амплитудных характеристик излучения, базирующийся на применении гибридной синхронизации мод с



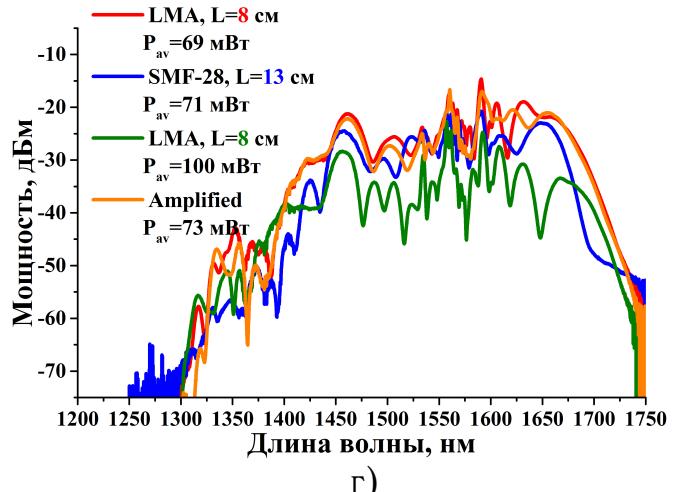
а)



б)



в)



г)

Рисунок 10. Выходные характеристики излучения лазера: а) автокорреляционные функции после усилителя; б) ширина огибающей оптического спектра излучения лазера после усилителя; в) автокорреляционные функции после компрессора; г) ширина огибающей оптического спектра излучения лазера после компрессора

одновременным использованием просветляющихся поглотителей на основе одностенных углеродных нанотрубок и нелинейной эволюции поляризации в волоконном световоде обеспечивает повышение стабильности амплитудных характеристик излучения эрбийевого волоконного ЛФИ за счет снижения уровня спектральной плотности мощности шума до значения < -120 дБн/Гц.

- Установлено, что использование режима генерации симиларитнов позволяет снизить значение девиации Аллана частоты повторения импульсов лазера до 7 раз по сравнению с ближайшими аналогами.
- Разработана методика идентификации режимов генерации в волоконных ЛФИ, основанная на анализе суммарной ДГС элементов резонатора ЛФИ и формы огибающей оптического спектра.
- Разработан метод исследования времени релаксации просветляющихся поглотителей на основе плёнок, основанный на регистрации длительности импульсов волоконного ЛФИ, работающего в режиме генерации солитонов.

- Проведены экспериментальные исследования одностенных углеродных нанотрубок, результаты которых подтвердили правильность основных теоретических положений, приведенных в работе.
- Создан экспериментальный образец полностью волоконного эрбиеового ЛФИ с гибридной синхронизацией мод, работающий в режиме генерации симиларитонов, с минимальной длительностью импульса 93 фс и энергией импульса 0,3 нДж.
- Разработан и реализован полностью волоконный эрбиеовый усилитель, повышающий пиковую мощность в 25 раз и уменьшающий длительность импульса до 29 фс, который позволяет использовать разработанный эрбиеовый ЛФИ в метрологии, терагерцовой спектроскопии и медицине.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Фемтосекундный волоконный лазер с гибридной синхронизацией мод для создания фемтосекундного делителя частоты / С.Г. Сазонкин [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, № 9 (21), С. 51. (0,86 п.л./0,36 п.л.)
2. Hybrid mode-locked ultrashort-pulse erbium-doped fiber laser / S.G. Sazonkin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, 2014 Т. 486. № 1, Р. 012004. (0,46 п.л./0,12 п.л.)
3. Ultra-short pulse generation in the hybridly mode-locked erbium-doped all-fiber ring laser with a distributed polarizer / S.G. Sazonkin [et al.] // Laser Physics Letters, 2015, Т. 12. № 6, Р. 065001. (0,61 п.л./0,23 п.л.)
4. Stable similariton generation in hybrid mode-locked erbium-doped all-fiber ring laser for application in optical frequency standard / S.G. Sazonkin [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2015, Т. 9450, Р. 945004 (0,81 п.л./0,35 п.л.)
5. Stable Similariton Generation in an All-fiber Hybrid Mode-locked Ring Laser for Frequency Metrology / S.G. Sazonkin [et al.] // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, Т. 63. № 7., Р. 1028-1033. (0,58 п.л./0,15 п.л.)
6. Генерация ультракоротких импульсов с минимальной длительностью 90 фс в полностью волоконном кольцевом эрбиеовом лазере с гибридной синхронизацией мод / С.Г. Сазонкин [и др.] // Квантовая электроника, 2016, Т. 46. № 11, С. 979-981. (0,35 п.л./0,11 п.л.)
7. Performance Peculiarities of Carbon Nanotube-Based Thin-Film Saturable Absorbers for Erbium Fiber Laser Mode-Locking / S.G. Sazonkin [et al.] // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics, 2016, Т. 33. № 2., Р. 134-142. (1,04 п.л./0,35 п.л.)
8. Sazonkin S.G., Krylov A.A. Sub-30 fs Pulse Generation from All-fiber MOPA Source through Dispersion and Nonlinearity Management of Amplifier and Compressor // 2017 CLEO/Europe-EQEC 2017, 2017, Р. CF_P_16 (0,12п.л./0,06 п.л.)