На правах рукописи

Зверев Андрей Дмитриевич

ВОЛОКОННЫЕ ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ГИГАГЕРЦОВОЙ И СУБГИГАГЕРЦОВОЙ ЧАСТОТАМИ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1.5-1.6 МКМ

1.3.19. Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук».

Научный руководитель:

Камынин Владимир Александрович – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории Активных сред твердотельных лазеров отдела лазерных кристаллов и твердотельных лазеров научного центра лазерных материалов и технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН).

Официальные оппоненты:

Каблуков Сергей Иванович – доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник лаборатории оптических сенсорных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук.

Воропаев Василий Сергеевич – кандидат техн. наук, младший научный сотрудник лаборатории инфракрасных лазерных систем НОЦ «Фотоника и ИК-техника» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «27» октября 2025 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.223.03 при ИОФ РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. №1, конференц-зал.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН и на сайте https://diss.gpi.ru/all
Автореферат диссертации разослан

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.223.03
канд. физ.-мат. наук
тел.: +7 (499) 503-8780 Осадчий Александр Валентинович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В настоящее время лазеры активно применяются во многих областях промышленности [1,2,3] и научно-исследовательской деятельности [4,5]. Существует множество типов лазеров (твердотельные, полупроводниковые, газовые и т.д.), которые работают в различных спектральных диапазонах и способны генерировать как непрерывное, так и импульсное оптическое излучение. Среди прочих очень хорошо себя зарекомендовали волоконные лазеры, активная среда которых выполнена на основе оптического волокна (световода) [6,7]. Современные волоконные лазеры обладают низкими внутрирезонаторными оптическими потерями, компактностью, надежностью и стабильностью работы. Их создание позволило полностью решить проблемы с трудоемкой и механически нестабильной юстировкой резонатора и, в значительной степени, с охлаждением активной среды лазера, что расширило возможность их применения и сделало практически незаменимыми в таких областях как: медицина [8], обработка материалов [9] и тд.

В последние годы, по мере развития как лазерных технологий, так и методов применения лазеров, возникла необходимость в создании волоконных лазеров с высокой частотой повторения ультракоротких импульсов (УКИ), длительности которых составляют менее нескольких пикосекунд. Они могут быть использованы в качестве накачки для источников суперконтинуума [10] или терагерцового излучения [11], также возможно их применение в микроскопии высокого разрешения [12], или перспективных широкополосных системах связи [13]. Получение УКИ в волоконных лазерах возможно за счет реализации режима пассивной синхронизации мод. Данный режим может быть получен с помощью эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации [14], использования нелинейного кольцевого зеркала [15] или внедрения в резонатор лазера насыщающихся поглотителей таких как графен [16], углеродные нанотрубки [17], топологические изоляторы [18,19], полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглотителем [20]. Для генерации УКИ с высокой частотой повторения, как правило, используют волоконные лазеры, работающие в режиме гармонической синхронизации мод [21,22]. Данный подход обладает несколькими недостатками, такими как нестабильность запуска и отсутствие повторяемости режимов работы. Увеличение

частоты следования импульсов так же возможно за счет уменьшения длины резонатора лазера с пассивной синхронизацией мод. С этой целью в последние годы в качестве активной среды в волоконных лазерах стали использоваться специальные композитные волокна с фосфатной сердцевиной (с высокой концентрацией активных ионов) и кварцевой оболочкой [23]. Благодаря композитной структуре, эти волокна обладают высоким оптическим усилением, механической стойкостью и совместимостью со стандартными кварцевыми волокнами.

Исследование лазеров с длиной волны излучения в области 1,55 мкм обусловлено тем, что минимум оптических потерь в световодах на кварцевой основе находится в данной спектральной области, а также совместимостью с телекоммуникационными техническими решениями. Поэтому под данный диапазон разработана широкая элементная и волоконная база, позволяющая создание источников излучения с уникальными временными характеристиками.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы являлось создание на основе композитных волокон, легированных ионами эрбия и комплексом эрбий-иттербий, источников ультракоротких импульсов (длительность менее 10 пс) с субгигагерцовыми и гигагерцовыми частотами повторения.

Для достижения заявленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование оптических свойств композитного волокна, легированного комплексом активных ионов Er/Yb (концентрации ионов Er и Yb $1{,}1\cdot10^{20}$ и $1{,}5\cdot10^{20}$ см$^{-3}$, соответственно)

2. Исследование оптических свойств насыщающегося поглотителя в виде аэрозольно-синтезированных бесполимерных пленок одностенных углеродных нанотрубок ОУНТ.

3. Исследование возможности генерации УКИ в линейных резонаторах на основе композитного волокна, легированного ионами Er (с концентрацией $1{,}6\cdot10^{20}$ см$^{-3}$) и бесполимерных пленок одностенных углеродных нанотрубок ОУНТ.

4. Оптимизация линейного резонатора с целью уменьшения его длины для увеличения частоты повторения УКИ.

5. Создание и оптимизация кольцевых лазерных источников УКИ с субгигагерцовыми частотами повторения на основе гибридных волоконных элементов.

6. Исследование гармонической синхронизации мод в 1,5-мкм волоконных лазерах с целью получения УКИ с гигагерцовыми частотами повторения.

Научная новизна работы

1. Впервые продемонстрирована генерация УКИ в коротких линейных резонаторах (длина менее 0,7 м) на основе композитного волокна, легированного ионами Er с концентрацией $1{,}6\cdot10^{20}$ см$^{-3}$, и насыщающегося поглотителя в виде аэрозольно-синтезированных одностенных углеродных нанотрубок. Показана достаточность использования 10 см композитного активного волокна для реализации стабильного режима генерации.

2. Впервые получен режим генерации УКИ в коротком линейном резонаторе (длина 0,68 м) на основе композитного волокна, легированного ионами Er, в полуторамикронном спектральном диапазоне с частотой следования 150 МГц. Продемонстрировано осуществление самозапуска и высокая стабильность режима генерации ультракоротких импульсов.

3. Впервые исследованы оптические характеристики активного композитного волокна, легированного комплексом активных ионов Er/Yb (концентрации активных ионов Er и Yb $1{,}1\cdot10^{20}$ и $1{,}5\cdot10^{20}$ см$^{-3}$, соответственно), такие как: поглощение, усиление, дисперсия.

4. Впервые продемонстрирована возможность создания семейства кольцевых, полностью волоконных лазеров УКИ с основной частотой следования в диапазоне от 100 до 484 МГц на основе композитного волокна, легированного комплексом активных ионов Er/Yb, ОУНТ и гибридных волоконно-оптических компонентов.

5. Впервые продемонстрирована реализация гармонической синхронизации мод в коротком кольцевом полностью волоконном лазере (длина резонатора менее 0,5 м). Показана возможность управления спектральными и временными характеристиками УКИ при изменении уровня накачки без срыва режима генерации.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты исследования оптических свойств композитного волокна и насыщающегося поглотителя на основе ОУНТ позволяют проводить теоретическое моделирование и проектирование лазерных систем, создаваемых на их основе.

Проведенные исследования показали возможность создания компактных, стабильных, полностью волоконных источников ультракоротких импульсов с высокой возможной частотой повторения в широком диапазоне от десятков до сотен МГц. Подобные источники могут использоваться в микроскопии высокого временного разрешения, связи и спектроскопии. Использование полностью волоконной схемы позволило существенно сократить внутрирезонаторные потери и уменьшить необходимые для осуществления генерации УКИ мощности накачки (по сравнению с аналогичными высокочастотными системами с объемными внутрирезонаторными элементами).

Экспериментально показано, что при сокращении длины резонатора до 0,42 м возможно гибкое управление режимами генерации. Использование композитного волокна и покрытие сварных соединений фотоотвержденным полимером позволили увеличить стойкость лазера к механическому воздействию и долговечность работы без деградации оптических элементов.

Положения выносимые на защиту

1. Источники ультракоротких импульсов, работающие в оптическом диапазоне 1,5 – 1,6 мкм с основной частотой повторения импульсов до 484 МГц реализуются на основе композитного волокна и аэрозольно-синтезированных одностенных углеродных нанотрубок.

2. Полностью волоконная схема резонатора с использованием композитного волокна, легированного комплексом активных ионов Er/Yb (концентрации ионов Er $1{,}1\cdot10^{20}$ см$^{-3}$ и Yb $1{,}5\cdot10^{20}$ см$^{-3}$), позволяет снизить необходимый уровень накачки до 135 мВт для реализации субгигагерцовых частот повторения ультракоротких импульсов.

3. Использование 1 слоя аэрозольно-синтезированных одностенных углеродных нанотрубок толщиной около 60 нм в полностью волоконных лазерах

позволяет осуществлять самозапуск режима генерации ультракоротких импульсов на основной субгигагерцовой частоте повторения импульсов при отношении сигнал/шум более 70 дБ.

4. В полностью волоконных лазерах с короткими резонаторами (длина менее 0,5 м), созданных на основе композитного волокна, осуществляется непрерывная перестройка длительности выходных импульсов и реализуется гармоническая синхронизации мод с частотой повторения импульсов 968 МГц при изменении уровня накачки.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в диссертационное исследование заключается в активном участии в постановке задач, разработке методов их решения, проведении экспериментов, а также обработке и анализе полученных результатов. Все данные, представленные в диссертации, были получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии.

Апробация работы.

Апробация данной работы была проведена на 12-ти научных конференциях: Russian fiber lasers, (Новосибирск, 2020); Russian fiber lasers, (Новосибирск, 2022); Russian fiber lasers, (Новосибирск, 2024); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2024), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2023), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2021); 31st annual International Laser PhysicsWorkshop (онлайн, 2023); International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT) (Самара, 2023); International Conference on Advanced Laser Technologies (Владивосток, 2024); Школа-конференция молодых ученых ИОФ РАН «Прохоровские недели» (Москва, 2022); Школа-конференция молодых ученых ИОФ РАН «Прохоровские недели» (Москва, 2024); 20th International Conference Laser Optics (Санкт-Петербург, 2022).

Так же результаты, диссертационной работы представлялись на научных семинарах ОЛК НЦЛМТ ИОФ РАН и НЦВО РАН. За доклад «Эрбиевый волоконный лазер с частотой повторения 300 МГц» в секции «Физика» Международной конференции

студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023» диссертант был награждён грамотой.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 6 работ в рецензируемых журналах из списка WoS и перечня ВАК. Список всех публикаций приведён в конце автореферата.

Методология и методы исследования

В ходе выполнения диссертационной работы был использован подход, объединяющий взаимодополняющие оптические, осциллографические и численные методы анализа основных характеристик активных волокон, что позволило исследовать генерационные характеристики и получить надежные численные данные по оптическим свойствам композитных волокон, легированных ионами эрбия и комплексом эрбий-иттербий. Методология включала в себя этапы подготовки образцов активных волокон, измерения генерационных характеристик различных конфигураций лазеров ультракоротких импульсов и последующего анализа данных с использованием численного моделирования и математической обработки. Исследования выполнены с использованием современного измерительного оборудования, включающего измеритель мощности OPHIR PD300-3W (исследование средней мощности генерации), анализаторы оптического спектра YOKOGAWA AQ6375B, YOKOGAWA AQ6370D, автокорреляторы FEMTOCHROME FR-103XL, AVESTA AA-20DD-6PS (измерение длительности импульсов). Временные характеристики последовательности импульсов фиксировались с помощью осциллографов Tektronix MDO3052, Tektronix MSO64, Tektronix DPO75002SX с полосой пропускания до 50 ГГц. Радиочастотные спектры сигналов исследовались с помощью Keysight MXA Signal Analyzer N9020B. Анализ спектральных характеристик, задачи численного моделирования и математической обработки производились с использованием программы Origin и модулей matplotlib, scipy.optimize, numpy (Python). Для моделирования распространения импульсов в оптическом волокне использовались математические пакеты MATLAB.

Достоверность результатов

Достоверность результатов основана на анализе предыдущих исследований и подтверждена сравнением результатов численного моделирования с

экспериментальными данными. Работа выполнялась с использованием современного научного оборудования, известных из публикаций и апробированных ранее физических моделей и вычислительных технологий, и специализированного математического программного обеспечения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлено объяснение актуальности темы диссертации, определена цель исследования и поставлены задачи работы. Продемонстрированы научная и практическая новизна результатов исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту, и приводятся данные об апробации работы.

В **главе 1** содержится обзор современных методов решения задач, сформулированных в диссертации. Проведен сравнительный анализ способов реализации ультракоротких импульсов (УКИ) в оптическом спектральном диапазоне 1,5 – 1,6 мкм. Так же показан ряд преимуществ и недостатков существующих способов увеличения частоты повторения УКИ.

В **главе 2** проведено исследование оптических свойств композитного волокна с фосфатной сердцевиной, легированной комплексом активных ионов редкоземельных элементов Er/Yb. Определено, что потери на сварных соединениях стандартного одномодового волокна с композитным не превышают 1 дБ. Коэффициенты поглощения на длинах волн накачки (976 нм) и в полуторамикронном диапазоне (1535,6 нм) составляют 1860 и 355 дБ/м, соответственно. При этом удельное усиление слабого сигнала составляет 60 дБ/м (в районе 1539 нм). Данные значения практически на порядок выше, чем у стандартного кварцевого активного волокна. Так же была показана возможность усиления УКИ с высокой частотой повторения в данном волокне (мощность усиливаемого сигнала 0,8 мВт, частота импульсов 92 МГц). При мощностях накачки 660 мВт в однопроходной и двухпроходной схемах были получены усиления в 7,3 и 7,9 дБ, соответственно. Был определен параметр дисперсии групповых скоростей для данного волокна (длина волны 1543,5 нм), который составлял -9,2 пс^2/км. Таким образом результаты показывают, что достаточным для генерации УКИ является использование этого волокна длиной ~10 см.

Так же были исследованы оптические свойства насыщающегося поглотителя в виде пленок ОУНТ. Глубина модуляции α_{s0} и мощность насыщения P_s одного слоя толщиной ~ 60 нм были равны 0,035 и 4,42 Вт, соответственно. Из предыдущих работ известно, что для реализации СМ достаточными значениями являются α_{s0} > 0,02 и P_s~5 Вт. Таким образом для генерации УКИ возможно использование одного слоя ОУНТ толщиной ~60 нм.

Глава 3 посвящена реализации эрбиевых волоконных лазеров с короткими линейными резонаторами. Изначально была продемонстрирована генерация УКИ в лазере с гантелевидным резонатором, созданном на основе стандартных оптических компонент (Рис. 1). Резонатор лазера был образован двумя кольцевыми зеркалами. Роль первого зеркала с высоким коэффициентом отражения (более 90%) выполнял волоконный разветвитель 50/50, замкнутый с одной из сторон. Излучение из резонатора выводилось через второе зеркало с переменным отражением, образованное циркулятором с поляризационным делителем. Коэффициент отражения данного зеркала и процент выводящейся из резонатора через поляризационный делитель мощности зависели от состояния поляризации света в резонаторе. Поэтому для возможности её изменения в схему были включены три контроллера поляризации. В качестве активной среды лазера использовалось стандартное эрбиевое волокно (поглощение на длинах волн 975 нм и 1535 нм были равны 10 дБ/м и 12,7 дБ/м, соответственно) длиной 2,4 м, которое накачивалось через оптический мультиплексор лазерным диодом на длине волны 974 нм. Синхронизация мод возникала за счет эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации.

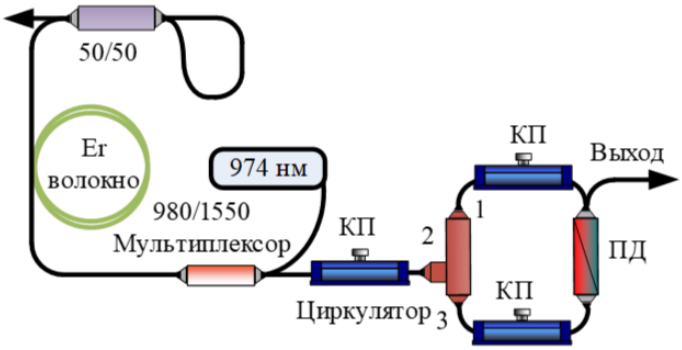

Рисунок 1 – Схема эрбиевого лазера с линейным (гантелевидным резонатором). КП – контроллер поляризации, ПД – поляризационный делитель.

Используя данную схему при мощности накачки 26 мВт был получен стабильный одноимпульсный режим генерации с основной частотой повторения УКИ 14 МГц. Лазер генерировал импульсы длительность 760 фс (рис. 2 (б)) на центральной длине волны излучения 1554 нм (рис. 2 (г)). Отношение сигнала к шуму в данном случае превышало 60 дБ (рис. 2 (в)), а выходная мощность была равна 0,6 мВт.

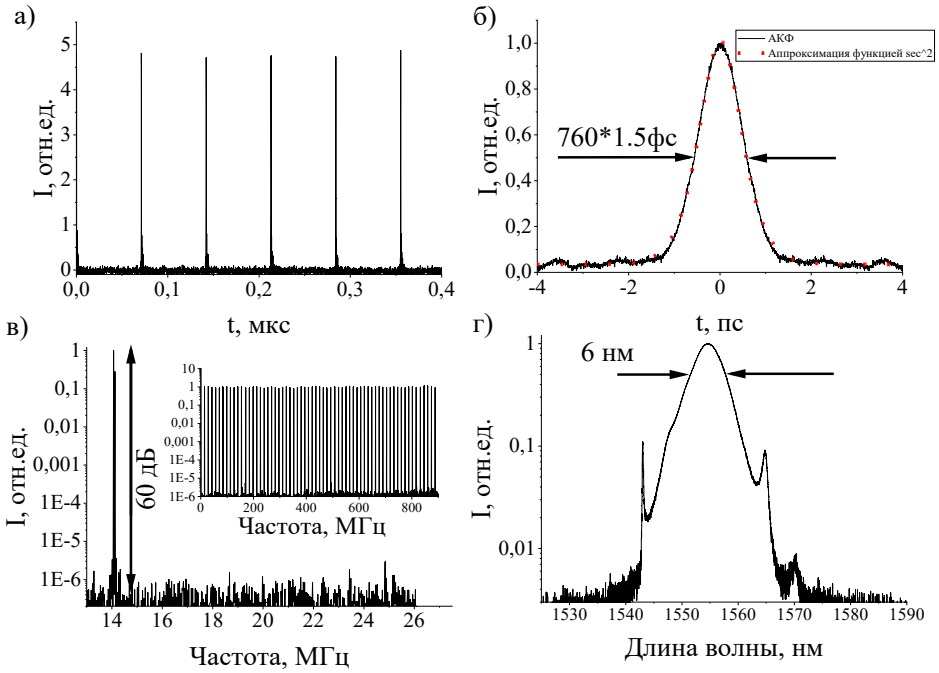

Рисунок 2 – Осциллограмма сигнала – (а); Автокорреляционная функция – (б); Радиочастотный спектр - (в); Оптический спектр - (г).

Далее была проведена оптимизация лазера с целью увеличения основной частоты повторения УКИ (уменьшение длины резонатора). Стандартное активное волокно было заменено на композитное. Данное волокно состояло из фосфатной сердцевины с высокой концентрацией ионов эрбия (~ $1{,}6 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$) и кварцевой оболочки. Оно не деградировало на воздухе, хорошо соединялось со стандартными компонентами (потери на сварных соединениях не превышали 1,5 дБ) и обладало высоким удельным коэффициентом усиления (~2 дБ/см). Это позволяло использовать всего 10 см волокна, для получения стабильных режимов генерации. Излучение накачки вводилось через оптический мультиплексор и разделитель, с делением 50/50 на длине волны 1550 нм (коэффициент деления на длине волны накачки 976 нм составлял 76/24). Кольцевые зеркала были заменены на широкополосные, образованные торцом оптического коннектора и

алюминиевой фольгой. Для реализации синхронизации мод на один из торцов предварительно наносились аэрозольно-синтезированные одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ). При максимально возможном сокращении, используемых компонент, удалось уменьшить общую длину резонатора до 0,67 м. Финальная схема лазера изображена на рис. 3 (а).

В данной конфигурации резонатора режим генерации УКИ (синхронизации мод) был реализован путем добавления 3 слоев ОУНТ, (с оценочной толщиной слоя 60 нм), между стандартным волоконным пигтейлом с полировкой под углом 90 градусов и алюминиевой фольгой. Стабильный режим генерации наблюдался при мощности накачки 530 мВт (эффективная мощность накачки оценивалась как 270 мВт). Спектральные характеристики выходного излучения представлены на рис. 3 (б). Ширина спектра на полувысоте составляла 3 нм.

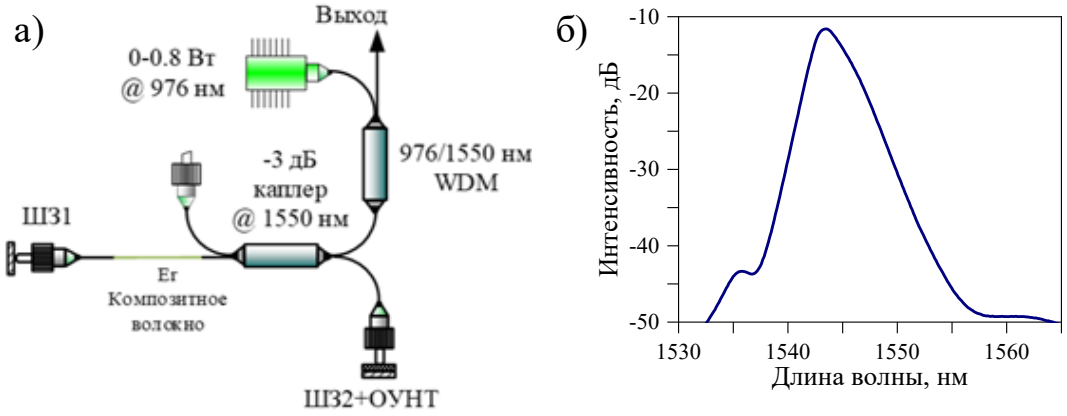

Рисунок 3 – Схема эрбиевого волоконного лазера (а), работающего в режиме пассивной синхронизации мод и спектр сигнала (б) при частоте повторения УКИ 150 МГц. ШЗ1 – широкополосное зеркало; ШЗ2 + ОУНТ соединённые оптические коннекторы, между которыми находятся нанотрубки (ОУНТ) и алюминиевая фольга. Длина резонатора 0,67 м.

Были получены УКИ с частотой следования 150 МГц при средней выходной мощности 6 мВт. Радиочастотный спектр и автокорреляционная функция сигнала представлены на рис. 4 (а) и (б), соответственно. Отношение сигнал/шум превышало 50 дБ. Измеренная длительность импульса, равная 973 фс, соответствовала произведению времени на

ширину спектра (в частотах) 0,34, что указывает на незначительную частотную модуляцию импульсов.

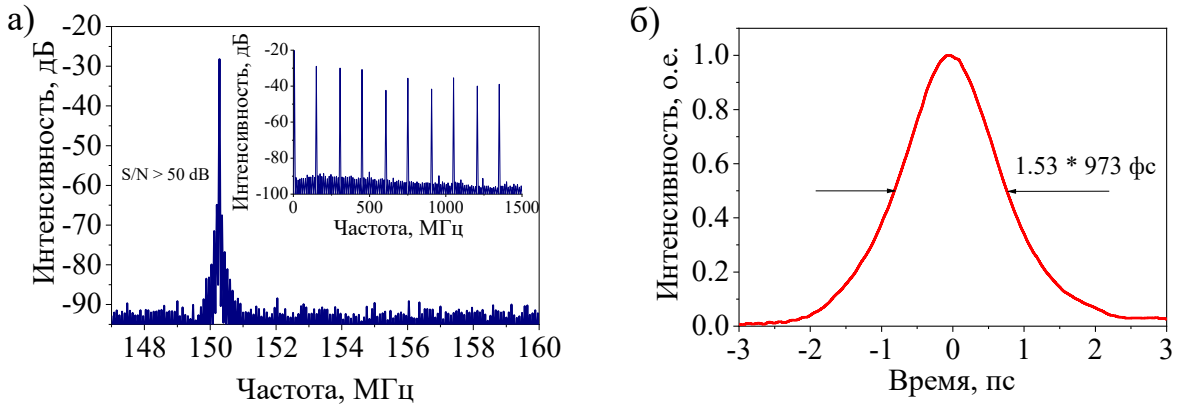

Рисунок 4 – Радиочастотный спектр (а) и автокорреляционная функция (б) сигнала.

Глава 4 посвящена реализации высокочастотных лазеров УКИ с кольцевыми резонаторами. Изначально, используя схему изображенную на рис. 5 (а), нам удалось получить режим гармонической синхронизации мод с частотой повторения импульсов выше 10 ГГц. Накачка эрбиевого волокна осуществлялась лазерным диодом на длине волны 974 нм. Интенсивности поглощения эрбиевого волокна в максимуме – на длинах волн 975 нм и 1535 нм были равны 10 дБ/м и 12,7 дБ/м, соответственно. Направленность генерации обеспечивалась наличием в схеме оптического изолятора. Излучение из резонатора выводилось через поляризационный делитель. Для возможности подстройки режимов генерации и изменения состояния поляризации света в резонаторе присутствовало два контроллера поляризации (КП). Синхронизация мод осуществлялась благодаря эффекту нелинейного вращения плоскости поляризации. Длина резонатора в данном случае составляла 8,9 м. Это соответствовало основной частоте повторения УКИ 23 МГц. В данном случае при мощности накачки 420 мВт был получен режим гармонической синхронизации мод с частотой повторения 23 ГГц. На рис. 5 (б) изображен радиочастотный спектр выходного сигнала.

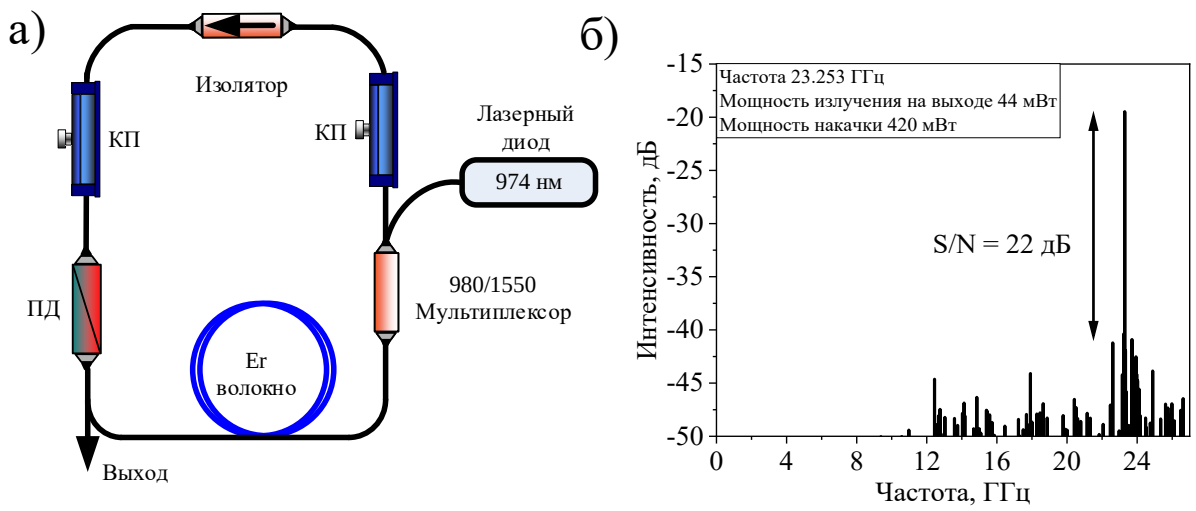

Рисунок 5 – Схема эрбиевого волоконного лазера с кольцевым резонатором (а) и радиочастотный спектр сигнала при реализации гармонической синхронизации мод (б). КП – контроллер поляризации; ПД – поляризационный делитель.

Максимально сокращая длину резонатора в данной конфигурации нам удалось увеличить основную частоту повторения импульсов до 92 МГц. При мощности накачки 20 мВт наблюдалась стабильная генерация УКИ длительностью 1,2 пс с центральной длиной волны излучения 1529 нм (рис. 6). Лазер генерировал импульсы длительностью 1,2 пс на центральной длине волны излучения 1529 нм. Выходная мощность была равна 0,265 мВт.

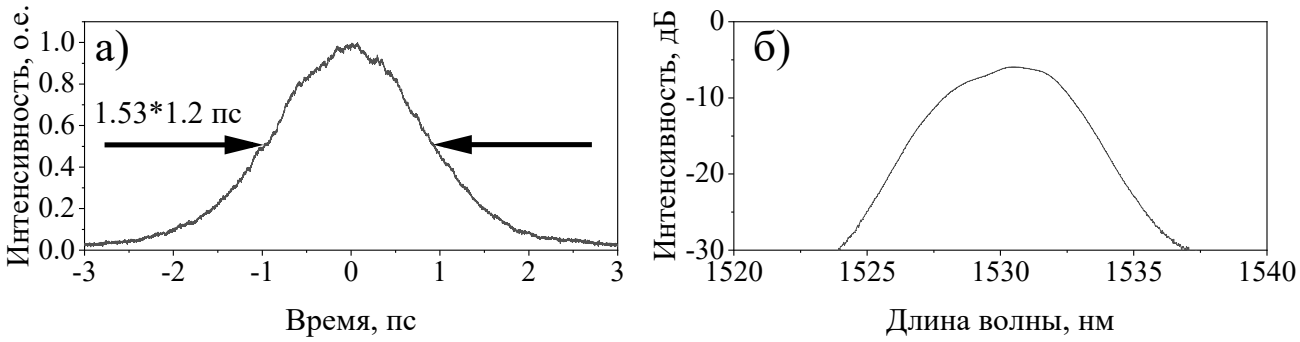

Рисунок 6 – АКФ (а) и оптический спектр (б) выходного сигнала эрбиевого волоконного лазера с длиной кольцевого резонатора 2,23 м.

Дальнейшее увеличение основной частоты повторения УКИ было возможно благодаря замене стандартного активного волокна на композитное, легированное комплексом активных ионов Er/Yb, и использование гибридных оптических компонент.

Схема композитного EYDF-лазера представлена на рис. 7. Длина активного волокна составляла 12 см. Оно накачивалось лазерным диодом на длине волны 976 нм через гибрид (WIT), который выполнял роль мультиплексора, изолятора и волоконного разветвителя. Коэффициент деления разветвителя составлял 85/15 (выход 15%). Для достижения синхронизации мод использовалось два слоя одностенных бесполимерных углеродных нанотрубок (ОУНТ), помещенных между двумя оптическими разъемами. Была проведена серия экспериментов, в которых постепенно уменьшалась длина резонатора до 0,6 метра, в то время как длина активного волокна оставалась неизменной. Изначально длина резонатора составляла 1,93 м. Устойчивая пассивная синхронизация мод была получена при мощности накачки 300 мВт. Лазер генерировал УКИ с частотой повторения 103,5 МГц и длительностью 4,5 пс (рис. 8 (а)) на центральной длиной волны излучения 1535 нм. Ширина спектра на полувысоте (FWHM) составляла 1 нм (рис. 8 (б)). Выходная мощность составляла 0,48 мВт.

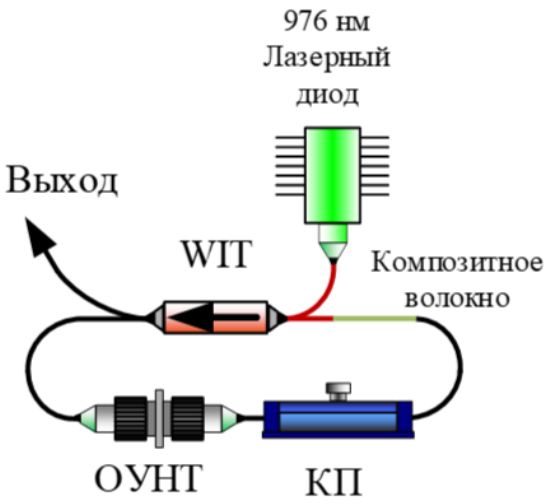

Рисунок 7 – Схема эрбиевого волоконного лазера. ОУНТ – соединенные оптические разъемы с пленками ОУНТ. КП - контроллер поляризации.

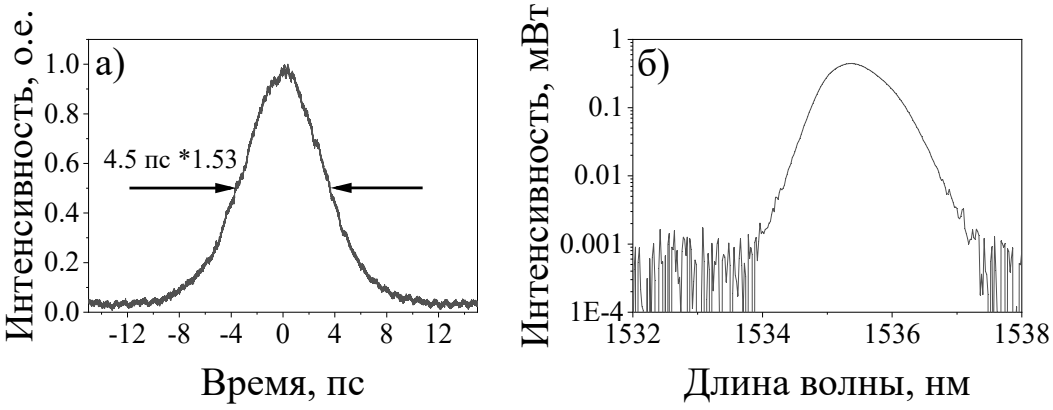

Рисунок 8 – Автокорреляционная функция (а) и оптический спектр (б) выходного сигнала (при длине резонатора 1,93 м).

Для дальнейшего уменьшения длины резонатора в представленной ранее конфигурации лазера был заменен волоконный гибридный элемент и использовалось 18 см активного композитного. Отличие нового WIT заключалось в уменьшенном значении коэффициента вывода из резонатора до 10%. Увеличенное значение длины активного волокна было обусловлено сложностью соединения отдельных компонент в резонаторе. Изначально все компоненты резонатора линейно сваривались друг с другом. Это позволяло уменьшить вероятность надлома сварных соединений, так как отсутствовали большие изгибы. Далее на один из торцов оптического коннектора наносились одностенные углеродные нанотрубки и замыкался с другим оптической муфтой, образуя кольцевой резонатор. Общая длина резонатора составляла L = 0,42 м (18 см активного композитного волокна с дисперсией групповых скоростей (GVD) -9,2 пс^2/км и отрезок стандартного одномодового волокна длиной 24 см с GVD -21,1 пс^2/км). Синхронизация мод достигалась за счет наличия в резонаторе одного слоя одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) толщиной ~60 нм. При мощности накачки 135,7 мВт был достигнут стабильный режим пассивной синхронизации мод с самозапуском. В одноимпульсном режиме лазер генерировал ультракороткие импульсы с частотой следования 484 МГц и длительностью 2,65 пс на центральной длине волны 1543,6 нм (разрешение анализатора спектра составляло 0,02 нм). Ширина спектра составляла λ_{FWHM} = 1,21 нм. Выходная мощность излучения составляла 0,77 мВт. Произведение длительности импульса на ширину спектра (TBP) было равно 0,40, что показывает, что импульс чирпирован. Из радиочастотных спектров в широком диапазоне 0-25 ГГц и узком 484-485 МГц (рис. 9)

следует, что лазер имеет основную частоту следования импульсов 484,2 МГц с отношением сигнал/шум (S/N) более 70 дБ.

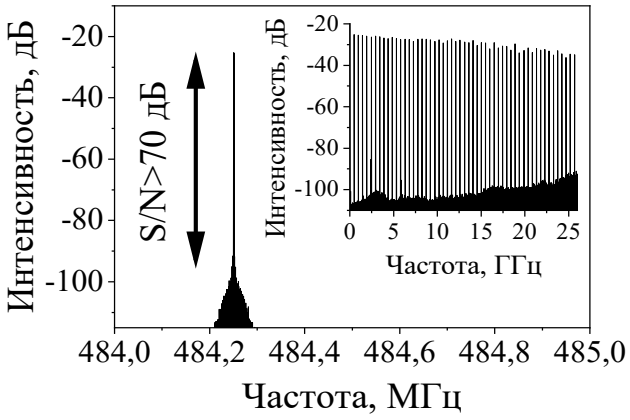

Рисунок 9 – Радиочастотный спектр сигнала.

Увеличение мощности лазерной накачки приводило к уширению спектра излучения (с 1,21 до 1,58 нм), уменьшению длительности импульса (с 2,65 до 2,3 пс) и увеличению мощности выходного сигнала (с 0,77 до 0,9 МВт). Эти изменения показаны на рис. 10.

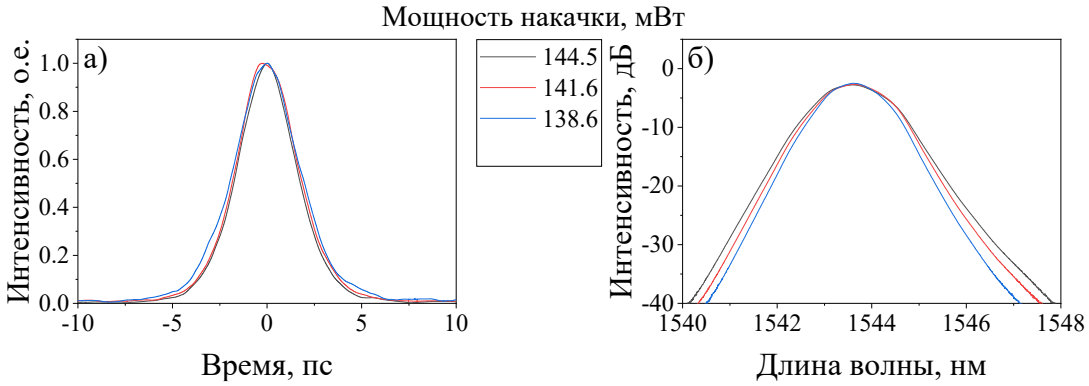

Рисунок 10 – Зависимости временных (а) и спектральных (б) характеристик сигнала лазера, работающего в режиме синхронизации мод при увеличении мощности накачки.

При мощности накачки 240 мВт мы получали стабильный режим генерации с частотой следования импульсов 968 МГц на центральной длине волны излучения 1542,8 нм (рис. 11, а). Подавление основной частоты повторения импульсов составляло 36 дБ (рис. 11, б). Средняя выходная мощность составляла 3 мВт.

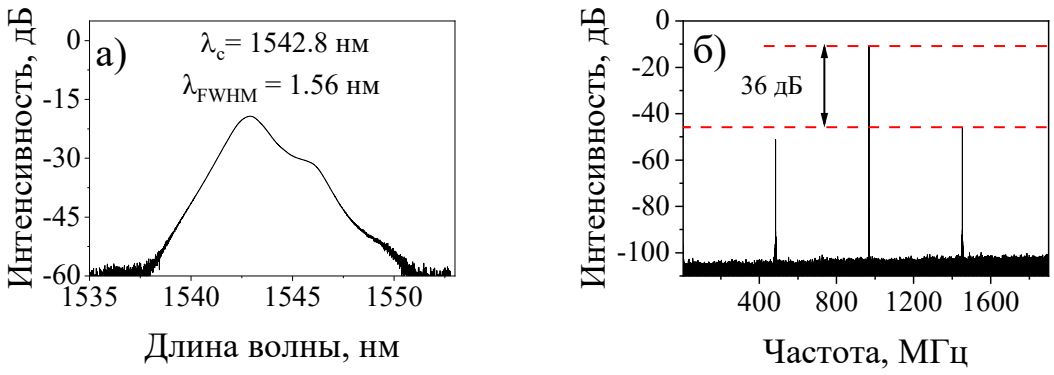

Рисунок 11 – Характеристики выходного сигнала при удвоенной частоте следования импульсов. (а) оптический спектр; (б) радиочастотный спектр.

В **заключении** были представлены основные результаты диссертационной работы:

1. Показана возможность создания источника ультракоротких импульсов с высокой частотой повторения и простой конструкцией резонатора на основе композитного волокна, легированного ионами Er с концентрацией $1{,}6\cdot10^{20}$ см$^{-3}$ и насыщающегося поглотителя в виде ОУНТ. Показано, что для устойчивой генерации достаточно 10 см активного волокна.

2. При оптимизации длины линейного резонатора композитного лазера впервые были продемонстрированы генерации в оптическом диапазоне 1.5 микрона с основной частотой повторения ультракоротких импульсов от 47 до 150 МГц. Продемонстрирован самозапуск и высокая стабильность работы лазера с резонатором менее метра за счет использования однослойных углеродных нанотрубок.

3. Впервые изучены оптические свойства композитного волокна, солегированного такими ионами редкоземельных элементов как Er (концентрация $1{,}1\cdot10^{20}$ см$^{-3}$) и Yb (концентрация $1{,}5\cdot10^{20}$ см$^{-3}$), включая поглощение, усиление и дисперсию. Также было проведено исследование оптических характеристик однослойных углеродных нанотрубок.

4. Показана возможность создания кольцевых полностью волоконных лазеров для генерации ультракоротких импульсов с основной частотой от 100 до 484 МГц. Эти лазеры были реализованы на основе композитного волокна, легированного комплексом Er/Yb, одностенных углеродных нанотрубках и гибридных волоконных компонентах.

5. Продемонстрирована перестройка режимов генерации в коротком (с длиной резонатора менее 0,5 метра) полностью волоконном лазере. Реализована гармоническая синхронизация мод с частотой следования ультракоротких импульсов порядка 1ГГц. Показано управление спектральными и временными параметрами импульсов, регулируя мощность накачки, без срыва режима генерации.

Список опубликованных работ

1. Passively mode-locked composite erbium fiber laser with a pulse repetition rate of 150 MHz / **A.D. Zverev**, V.A. Kamynin, S.A. Filatova [et al.] // Optik. - 2022. - Т. 249. - С. 168218.

2. Er-Yb all-fiber laser with a repetition rate for ultrashort pulses of 300 MHz / **A. Zverev**, V. Kamynin, V. Tsvetkov [et al.] // Optical Fiber Technology. - 2024. - Т. 88. - С. 104007.

3. **Зверев, А.Д.** ЭРБИЕВЫЙ ИСТОЧНИК УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ГИГАГЕРЦОВЫМИ ЧАСТОТАМИ ПОВТОРЕНИЯ / **А.Д. Зверев**, В.А. Камынин, В.Б. Цветков // Фотон-экспресс. - 2023. - № 6 (190). - С. 221-222.

4. Comparison of Mode Locking Regimes Based on Nonlinear Rotation of the Polarization Plane in Erbium Fiber-Optic Lasers with Dumbbell-Type and Annular Cavity Designs / **A.D. Zverev**, V.A. Kamynin, V.B. Tsvetskov [et al.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. - 2022. - Т. 49. - № Suppl 1. - С. S35-S42.

5. Korobko, D., Kamynin, V., Salganski, M., Sysoliatin, A., Zhluktova, I., **Zverev, A.**, ... & Tsvetkov, V. (2023). control of supercontinuum generation due to soliton propagation in fibers with varying dispersion. Optik, 287, 171032. Control of supercontinuum generation due to soliton propagation in fibers with varying dispersion / D. Korobko, V. Kamynin, M. Salganski, A Sysoliatin, I. Zhluktova, **A. Zverev** [et al.] // Optik. - 2023. - Т. 287. - С. 171032.

6. **Зверев А. Д.** СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ГАНТЕЛЕВИДНОМ ЭРБИЕВОМ ЛАЗЕРЕ / **А. Д. Зверев**, В. А. Камынин, В. Б. Цветков //Фотон-экспресс. – 2021. – №. 6 (174). – С. 106-107.

Цитируемая литература

1. Padmanabham, G. Laser materials processing for industrial applications / G. Padmanabham, R. Bathe // Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences. – 2018. – Т. 88. – С. 359-374.

2. Dutta, M.J. Laser material processing / M.J. Dutta, I. Manna // International materials reviews. – 2011. – Т. 56. – № 5-6. – С. 341-388.

3. Applications of lasers in industries and laser welding: A review / J.R. Deepak, R.P. Anirudh, S.S. Sundar [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2023.

4. Miotello, A. Advances in the application of lasers in materials science / A. Miotello, M. Dinescu, D.B. Geohegan [et al.]. – Cham : Springer, 2018. – Т. 274.

5. Endo, Y. Diode laser spectroscopy of the SF radical / Y. Endo, K. Nagai, C. Yamada [et al.] // Journal of Molecular Spectroscopy. – 1983. – Т. 97. – № 1. – С. 213-219.

6. Dong, L. Fiber lasers: basics, technology, and applications / L. Dong, B. Samson. – CRC press, 2016.

7. Recent advances in soft optical glass fiber and fiber lasers / W.C. Wang, B. Zhou, S.H. Xu [et al.] // Progress in Materials Science. – 2019. – Т. 101. – С. 90-171.

8. Gursel, A.T. Fiber lasers and their medical applications / A.T. Gursel // Optical Amplifiers—A Few Different Dimensions. – 2018. – С. 13.

9. Shiner, B. Fiber lasers for material processing / B. Shiner // Critical Review: Industrial Lasers and Applications. – SPIE, 2005. – Т. 5706. – С. 60-68.

10. Infrared supercontinuum generation in soft-glass photonic crystal fibers pumped at 1560 nm / G. Sobon, J. Sotor, I. Pasternak [et al.] // Optical Materials Express. – 2014. – Т. 4. – № 1. – С. 7-15.

11. Lohner, A. Generation of 200 femtosecond pulses tunable between 2.5 and 5.5 μm / A. Lohner, P. Kruck, W.W. Rühle // Applied Physics B. – 1994. – Т. 59. – № 2. – С. 211-213.

12. High-sensitivity coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy with two tightly synchronized picosecond lasers / E.O. Potma, D.J. Jones, J.X. Cheng [et al.] // Optics letters. – 2002. – Т. 27. – № 13. – С. 1168-1170.

13. Coherent optical communications & signal processing using optical frequency combs / W. Lee, M. Choi, S. Ozharar [et al.] // Digest of the LEOS Summer Topical Meetings, 2005. – 2005. – С. 213-214.

14. Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation / V.J. Matsas, T.P. Newson, D.J. Richardson [et al.] // Electronics Letters. – 1992. – Т. 28. – № 15. – С. 1391-1393.

15. Duling, I.N. All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror / I.N. Duling // Optics letters. – 1991. – Т. 16. – № 8. – С. 539-541.

16. Passive synchronization of erbium and thulium doped fiber mode-locked lasers enhanced by common graphene saturable absorber / J. Sotor, G. Sobon, J. Tarka [et al.] // Optics Express. – 2014. – Т. 22. – № 5. – С. 5536-5543.

17. Spectral and temporal dynamics of ultrashort pulses in a holmium-doped fibre amplifier / S.A. Filatova, V.A. Kamynin, I.V. Zhluktova [et al.] // Quantum Electronics. – 2019. – Т. 49. – № 12. – С. 1108.

18. Soliton mode-locked fiber laser based on topological insulator Bi2Te3 nanosheets at 2 μm / K. Yin, B. Zhang, L. Li [et al.] // Photonics Research. – 2015. – Т. 3. – № 3. – С. 72-76.

19. Femtosecond pulse generation from a topological insulator mode-locked fiber laser / H. Liu, X.W. Zheng, M. Liu [et al.] // Optics express. – 2014. – Т. 22. – № 6. – С. 6868-6873.

20. Kivistö, S. 600-fs mode-locked Tm–Ho-doped fiber laser synchronized to optical clock with optically driven semiconductor saturable absorber / S. Kivistö, O.G. Okhotnikov // IEEE Photonics Technology Letters. – 2011. – Т. 23. – № 8. – С. 477-479.

21. Passive harmonic mode-locking in an erbium-doped fibre laser / A.I. Trikshev, V.A. Kamynin, V.B. Tsvetkov [et al.] // Quantum Electronics. – 2018. – Т. 48. – № 12. – С. 1109.

22. Wu, C. High-repetition-rate optical pulse generation using a rational harmonic mode-locked fiber laser / C. Wu, N.K. Dutta // IEEE journal of quantum electronics. – 2000. – T. 36. – № 2. – C. 145-150.

23. Gain characteristics of fibers with a heavily erbium-doped phosphate-based core and silica cladding /B.I. Denker, B. I. Galagan, V.A. Kamynin [et al.] //Journal of the Optical Society of America B. – 2019. – T. 36. – №. 10. – C. 2705-2711.