Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

На правах рукописи

Blue

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

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук Камынин Владимир Александрович

Оглавление

Список сокращений 5
Введение
Глава 1. Литературный обзор 14
1.1. Импульсные волоконные лазеры, работающие в полуторамикронном
спектральном диапазоне14
1.2. Генерация ультракоротких импульсов 16
1.3. Пассивная синхронизация мод 19
1.3.1. Нелинейное вращения плоскости поляризации
1.3.2. Одностенные углеродные нанотрубки
1.4. Способы увеличения частоты повторения ультракоротких импульсов 25
1.4.2. Системы умножения частоты
1.4.3. Внедрение в резонатор гребенчатых частотных фильтров
1.4.4. Уменьшение длины волоконных резонаторов
1.4.5. Сравнительная таблица
1.5.1. Активные световоды, легированные эрбием
1.5.2. Композитные волокна, легированные комплексом Er/Yb
Выводы к главе 1
Глава 2. Исследование оптических свойств композитных волокон и одностенных
углеродных нанотрубок
2.1. Исследование спектров поглощения композитного волокна
1.2. Исследование усиления
1.3. Исследование усиления УКИ в композитном волокне
2.4. Параметр дисперсии групповых скоростей

2.5. Глубина модуляции ОУНТ		
Выводы по главе 2		
2. Линейные лазеры на основе композитного волокна и одностенных углеродных		
нанотрубок		
3.1. Эрбиевый лазер с гантелевидной схемой резонатора		
3.2. Замена стандартного эрбиевого волокна на композитное, использование		
ОУНТ для синхронизации мод		
3.3. Замена кольцевого зеркала на широкополосное		
3.4. Нанесение ОУНТ на широкополосное зеркало		
3.5. Осуществление накачки композитного волокна через оптический		
мультиплексор и разделитель		
3.6. Оптимизация длины линейного резонатора 70		
Выводы по главе 372		
4. Лазеры с кольцевыми резонаторами. Генерация ультракоротких импульсов с		
субгигагерцовыми и гигагерцовыми частотами повторения		
4.1. Получение гигагерцовых частот повторения УКИ в кольцевом резонаторе за		
счет реализации гармонической синхронизации мод		
4.2. Минимизация длины эрбиевого лазера с кольцевым резонатором		
4.3. Полностью волоконный лазер с резонатором, образованным волоконным		
гибридным элементом		
4.4. Увеличение частоты повторения ультракоротких импульсов за счет		
уменьшения длины резонатора в композитном EYDF-лазере		
4.5. Лазер с частотой следования ультракоротких импульсов 484 МГц 86		
4.6. Изменение режимов генерации в лазере с основной частотой повторения		
ультракоротких импульсов 484 МГц. Гармоническая синхронизация мод 90		
Выводы по главе 4		

Заключение	
Список цитируемой литературы	
Список публикаций автора по теме диссертации	
Список докладов на конференциях по теме диссертации	

Список сокращений

- УКИ ультракороткие импульсы
- ОУНТ одностенные углеродные нанотрубки
- СМ синхронизация мод
- АСМ активная синхронизация мод
- ПСМ пассивная синхронизация мод
- АОМ акустооптический модулятор
- ЭОМ электрооптический модулятор
- НП насыщающийся поглотитель
- КП контроллер поляризации
- ГСМ гармоническая синхронизация мод
- $\Phi\Pi \Phi$ абри-Перо
- АОС анализатор оптического спектра
- ШЗ широкополосное зеркало

Введение

Актуальность темы исследования

В настоящее время лазеры активно применяются во многих областях промышленности [1,2,3,4] и научно-исследовательской деятельности [5,6]. 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) [7,8]. 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 [9], обработка материалов [10] 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 [11] или терагерцового излучения [12], также возможно их применение в микроскопии высокого разрешения [13], или перспективных широкополосных системах связи [14]. 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 [15], использования нелинейного кольцевого зеркала [16] или внедрения в резонатор лазера насыщающихся поглотителей таких как графен [17], углеродные нанотрубки [18],

топологические изоляторы [19,20], полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглотителем [21]. Для генерации УКИ с высокой частотой повторения, как правило, используют волоконные лазеры, работающие в режиме гармонической синхронизации мод [22,23]. 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 [24]. 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 [25]. 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 1,6·10²⁰ 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 1,6·10²⁰ 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 1,1·10²⁰ и 1,5·10²⁰ 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, OУНТ 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-Питербург, 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 18 работ, из которых 12 в трудах конференций, 6 в рецензируемых журналах из списка WoS и перечня ВАК. Список всех публикаций приведён на странице 114.

Методология и методы исследований

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 подтверждена сравнением результатов численного моделирования И с Работа экспериментальными данными. выполнялась с использованием современного научного оборудования, известных ИЗ публикаций И апробированных ранее физических моделей и вычислительных технологий, и специализированного математического программного обеспечения.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Список литературы содержит 123 наименования. Объем диссертации составляет 117 страниц, в том числе 72 рисунков и 10 таблиц.

Глава 1. Литературный обзор

1.1. Импульсные волоконные лазеры, работающие в полуторамикронном спектральном диапазоне.

В волоконных лазерах для получения излучения в оптическом диапазоне 1,5-1,6 мкм используют оптические волокна, легированные редкоземельными ионами, такими как Er, либо комплексом Er/Yb. Усиление света в данных световодах определяется схемой энергетических уровней Er изображенной на рисунке 1.



Рисунок 1 – Упрощенная схема энергетических уровней ионов Ег в кварцевом стекле [26].

В эрбиевом волокне усиление света происходит за счет переходов ионов эрбия между двумя энергетическими состояниями: ${}^{4}I_{13/2}$ (уровень 2) и ${}^{4}I_{15/2}$ (уровень 1). При накачке, ионы эрбия переходят из основного состояния (уровень 1) на более высокий уровень 3. Этот уровень имеет короткое время жизни ($\tau_3 \approx 1$ мкс), и ионы быстро релаксируют на метастабильный уровень 2, который является долгоживущим ($\tau_3 \approx 10$ мс). Время жизни на уровне 2 намного больше, чем на уровне 3, поэтому при достаточно высокой мощности накачки на этом уровне накапливается большое количество ионов. Так как ионы могут оставаться на уровне 2 длительное время, это создает условия для усиления света, когда ионы переходят обратно на уровень 1, испуская фотоны. Уровень 1 называется основным, так как при отсутствии накачки почти все ионы находятся на этом уровне, а доля частиц на других уровнях минимальна. На рис. 2 представлены характерные спектры поглощения и усиления ионов эрбия.



Рисунок 2 – Спектры усиления/поглощения эрбиевого волокна при разных значениях относительной населенности метастабильного уровня энергии от 0 до 100% с шагом 10%. [26]

Получение импульсного излучения в волоконных лазерах возможно за счет реализации таких методов как модуляция добротности (Q-switch), модуляция накачки (Gain-switch) или синхронизация мод.

Первый метод, предложенный Робертом Хеллвартом, основан на периодическом изменении потерь в резонаторе. Типичные длительности импульсов для эрбиевых волоконных лазеров в режиме модуляции добротности находятся в диапазоне от наносекунд до микросекунд в зависимости от конкретной реализации. Наносекундные импульсы (обычно в диапазоне от 10 до 500 наносекунд) могут достигаться с помощью активной модуляции добротности, при использовании акустооптических или электрооптических модуляторов [27,28]. Микросекундные импульсы (до нескольких микросекунд) могут генерироваться при использовании пассивной модуляции добротности, например, с применением насыщаемых поглотителей [29]. Конкретные параметры импульсов зависят от

конструкции резонатора, длины волны генерации, мощности накачки и типа модулятора добротности.

Метод модуляции накачки основан на генерации коротких импульсов лазерного излучения за счет быстрого изменения коэффициента усиления активной среды [30, 31, 32]. Накачка активной среды (электрическим током или светом) включается на некоторое время, что приводит к быстрому накоплению инверсии населённостей. Когда усиление в активной среде превышает потери, начинается генерация лазерного излучения. После начала генерации инверсия населённостей быстро истощается, что приводит к короткому импульсу излучения. С помощью данного метода возможно получение импульсов с длительностями в широком диапазоне от нескольких наносекунд до пикосекунд. Преимуществами данного метода можно считать простоту реализации отсутствие сложной настройки резонатора (подстройка поляризации) и гибкость в подстройке характеристик выходных импульсов. К недостаткам данного метода можно отнести меньшую стабильность, работы, по сравнению с методом синхронизации мод и ограниченные частоты повторения импульсов. Данные параметры напрямую зависят от качества источника накачки и от используемых методов его модуляции.

1.2. Генерация ультракоротких импульсов

Для получения коротких, пико- и фемтосекундных лазерных импульсов, как правило, используется метод синхронизации продольных мод (СМ) [33, 34, 35].

Чтобы световая волна могла устойчиво существовать в резонаторе, ее фаза после полного обхода должна совпадать с начальной. Набор частот электромагнитного излучения, для которых выполняется данное условие, называется продольными модами резонатора. Это условие приводит к тому, что длина резонатора L должна быть кратной половине длины волны света λ:

$$L = \frac{k \cdot \lambda_k}{2} \tag{1}$$

где k — целое число (порядок моды). Данное соотношение типично для линейных лазеров, где свет проходит резонатор дважды. В кольцевых лазерах, где свет движется по замкнутому контуру:

$$L = k \cdot \lambda_k \tag{2}$$

Количество продольных мод, которые могут существовать в резонаторе, зависит от ширины спектра усиления активной среды лазера. Чем шире спектр усиления, тем больше мод может быть возбуждено. Частота v_k k-ой моды связана с длиной волны следующим выражением:

$$v_{k} = \frac{c}{\lambda_{k}},\tag{3}$$

где с – скорость распространения света в среде (резонаторе). Разность частот ∆v_м между соседними модами определяется как:

$$\Delta \nu_{\rm M} = \frac{\rm c}{2 \cdot \rm L} \tag{4}$$

В случае с кольцевыми резонаторами:

$$\Delta \nu_{\rm M} = \frac{\rm c}{\rm L} \tag{5}$$

В обычном режиме работы лазера (из-за флуктуаций) фазы продольных мод случайны и результатом их сложения является непрерывное излучение. При синхронизации, создаются условия, в которых разность фаз $\Delta \phi$ на выходе из резонатора для всех пар соседних мод одинакова (в идеальном случае $\Delta \phi=0$ и моды колеблются в фазе). В этом случае они положительно интерферируют и лазер генерирует короткий световой импульс.

На практике, длительность импульса Δt и ширина его спектра Δν (образованного синхронизированными модами) связаны фундаментальным соотношением, известным как соотношение неопределённостей для импульсов:

$$\Delta t \cdot \Delta \nu \ge K \tag{6}$$

где Δt и Δv измеряются на полувысоте, К — константа, которая зависит от формы импульса.

Это соотношение является следствием принципов Фурье-анализа и применимо к любым волновым процессам, включая световые импульсы [36]. Для гауссовых импульсов К ≈ 0,44 [37], а для секанс-гиперболических импульсов К ≈ 0,315 [38].

Таким образом, длительность импульсов существенно зависит от ширины спектра синхронизированных мод, которая определяется параметрами резонатора, прежде всего полосой усиления используемой активной среды. В современных лазерах благодаря СМ удается реализовать генерацию УКИ с длительностями менее нескольких десятков фемтосекунд (Δv более 0,3 ТГц).

Существующие методы реализации СМ можно разделить на активные и пассивные. Методы активной СМ (АСМ) основаны на периодическом изменении параметров резонатора лазера (внутрирезонаторных потерь, усиления и т.д.). Они требуют наличие внешнего сигнала. Получение АСМ возможно за счет периодического изменения пропуская в резонаторе с помощью электро- или акустооптических модуляторов (ЭОМ, АОМ) [39, 40, 41, 42]. Так при использовании АОМ, в резонаторе лазера реализуется амплитудная модуляция света. При частоте модуляции $P_{\rm M}$ в спектре моды $v_{\rm k}$ образуются дополнительные частоты $v_{\rm k}+P_{\rm M}$ и $v_{\rm k}-P_{\rm M}$, которые синфазны. Если они совпадают с соседними модами $v_{\rm k}+P_{\rm M}$ = $v_{\rm k+1}$ и $v_{\rm k}-P_{\rm M}$ = $v_{\rm k-1}$ (при $P_{\rm M} = \Delta v_{\rm M}$), то устанавливается фазовая согласованность. Таким образом возможна реализация синхронизации всех мод в резонаторе.

На рис. 3 изображена схема эрбиевого волоконного лазера с внутрирезонаторным АОМ, генерирующего УКИ за счет активной синхронизации мод [39].



Рисунок 3 – Схема волоконного лазера с внутрирезонаторным AOM, работающего в режиме активной синхронизациии мод.

Накачка эрбиевого волокна осуществлялась через оптический мультиплексор полупроводниковым диодом. Изолятор и контроллер поляризации, основанный на комбинации четвертьволновой и полуволновой пластин, использовались для обеспечения однонаправленной работы и для регулировки поляризации, соответственно. Синхронизация мод осуществлялась за счет наличия в резонаторе акустооптического модулятора. В данной работе был получен режим активной синхронизации мод с частотой следования импульсов равной 1,83 МГц.

1.3. Пассивная синхронизация мод

Несмотря на идеологическую простоту реализации активная синхронизация мод имеет несколько серьезных недостатков, которые особенно актуальны при приближении к генерации импульсов с субгигагерцовыми и гигагерцовыми частотами повторения. Первое – это сложность конструкции и управления. Второе – использование активных модуляторов может вносить дополнительные

внутрирезонаторные потери в систему, которые могут превышать 3 дБ. Третье – это необходимость использования точных дорогостоящих радиочастотных генераторов. При получении УКИ за счет пассивной синхронизации мод (ПСМ) данные проблемы отсутствуют.

В методах ПСМ сам свет в резонаторе изменяет оптические параметры в каком-то внутрирезонаторном элементе, который затем производит модуляцию света. Получение ПСМ возможно за счет нелинейных эффектов (самофокусировка [43], нелинейное вращение плоскости поляризации и т.д.). Так же ПСМ может быть реализована с помощью насыщающихся поглотителей.

Насыщающийся поглотитель (НП) – это элемент, пропускание которого увеличивается (он становится более прозрачным) при повышении интенсивности проходящего через него излучения. При помещении в резонатор, насыщающийся поглотитель вносит дополнительные потери для низкоинтенсивного непрерывного света. За счет этого, после многократного обхода резонатора, из выбросов высокой интенсивности, которые распространяются через НП без ослабления, формируются импульсы и происходит синхронизация мод лазера [44, 45]. В качестве насыщающихся поглотителей В последние годы активно используются графен, нелинейные топологические изоляторы, кольцевые зеркала, полупроводниковые зеркала (SESAM) и углеродные нанотрубки.

1.3.1. Нелинейное вращения плоскости поляризации

Одним из эффектов, который возможно использовать для реализации пассивной синхронизации мод, является нелинейное вращение плоскости поляризации [46, 47, 48].

НВПП – это явление изменения состояния поляризации света (вращения эллипса поляризации) в зависимости от его интенсивности (эффект Керра, при котором интенсивность света влияет на показатель преломления материала). На

рис. 4 показан возможный механизм переключения пропускания системы при НВПП [49]. Линейно поляризованный свет, проходящий через поляризатор, эллиптически поляризуется контроллером поляризации (КП 1). При низкой интенсивности света, НВПП отсутствует и с помощью второго контроллера поляризации (КП 2) возможно обеспечить высокие потери в анализаторе. При прохождении через данную систему света высокой интенсивности, происходит нелинейное вращение эллипса поляризации и возможно прохождение анализатора практически без потерь.



Рисунок 4 – Механизм переключения пропускания системы при нелинейном вращении эллипса поляризации.

Таким образом, помещая подобную (Поляризатор + КП 1+ Волокно + КП 2 + Анализатор) или аналогичную структуру в резонатор лазера, можно обеспечить дополнительные потери для непрерывного излучения. При этом высокоинтенсивные, импульсные компоненты, не испытывают ослабление, что и позволяет реализовать СМ.

В работе [49] благодаря НВПП в относительно простой кольцевой схеме волоконного лазера был продемонстрирован режим ПСМ с частотой повторения УКИ 56 МГц. Лазер генерировал импульсы длительностью 145 фс на центральной длине волны излучения 1555 нм. Схема лазера показана на рис. 5.



Рисунок 5 – Лазер, работающий в режиме ПСМ за счет эффекта НВПП. КП 1, КП 2 – контроллеры поляризации.

Реализация синхронизации мод за счет НВПП обладает следующими преимуществами:

- Так как эффект Керра, происходит практически мгновенно, с характерным временем отклика порядка 10⁻¹⁵–10-14 секунд, за счет НВПП возможно получение ультракоротких импульсов с длительностями от десятков до сотен фемтосекунд.
- Доступность материальной базы (волоконные поляризационные делители, контроллеры поляризации и т.д.).
- Простота и надежность лазерных источников УКИ, реализованных на основе НВПП.

К недостаткам можно отнести следующие:

• Сложность настройки поляризации в резонаторе для реализации генерации УКИ.

- Из-за необходимости наличия в лазере поляризационно-зависимого элемента длина резонатора зачастую превышает несколько метров (отсутствие компактности).
- Сильная чувствительность к вибрациям и положениям отдельных компонент резонатора.

1.3.2. Одностенные углеродные нанотрубки

Так же относительно простым способом реализации пассивной синхронизации мод является помещение в резонатор насыщающегося поглотителя в виде одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ).

ОУНТ [50, 51] представляют собой свернутые в цилиндры полосы графеновых листов [52]. Эти структуры стабильны при диаметре трубки от 5 до 20 Å. Впервые синтез ОУНТ был осуществлен методом каталитического лазерного испарения графита [53, 54, 55]. Так же одним из изначальных методов синтеза ОУНТ является электродуговой [56]. Современные же методы создания ОУНТ, такие как каталитический пиролиз углеродсодержащих газов [57, 58, 59], разложение СО при высоком давлении [60, 61] и аэрозольный метод [62], в качестве катализатора используют металлические частицы. Форма и размеры ОУНТ определяются методом синтеза.

У ОУНТ пропускание зависит от интенсивности проходящего через них света. При возрастании интенсивности наблюдается нелинейный эффект просветления. Это позволяет их использовать в качестве насыщающегося поглотителя при реализации режима пассивной синхронизации мод.

Стоит отметить простоту использования ОУНТ. Зачастую их наносят между торцами внутрирезонаторных оптических разъемов [63, 64, 65, 66]. Так же было замечено их положительное влияние на улучшение шумовых характеристик

выходного сигнала лазера и возможность осуществления самозапуска режимов генерации [67, 68, 69].

На рис. 6 изображена характерная схема резонатора лазера, используемая в работе [70], в котором СМ осуществляется за счет наличия в резонаторе ОУНТ. В данной работе авторами при мощности накачки 100 мВт был получен режим генерации УКИ. Частота повторения импульсов была равна 60,8 МГц при выходной мощности 4,4 мВт.



Рисунок 6 – Лазер, работающий в режиме ПСМ за счет наличия в резонаторе ОУНТ (SAINT). ISO – изолятор; EDF – эрбиевое активное волокно.

Использование ОУНТ в качестве насыщающегося поглотителя обладает следующими преимуществами:

- Простота интеграции в волоконную лазерную систему.
- Нанотрубки могут поглощать свет в широком спектральном диапазоне (сотни нм).
- Низкий порог насыщения (могут использоваться в лазерах с низкой мощностью накачки).

Но стоит отметить несколько недостатков:

- Относительно протяженное время восстановления поглощения у нанотрубок, которое составляет порядка 10⁻¹² секунд (возможно получение УКИ с длительностями от нескольких сотен фемтосекунд).
- Возможна деградация ОУНТ в резонаторе лазера при переходных режимах генерации.

1.4. Способы увеличения частоты повторения ультракоротких импульсов

Существует несколько способов увеличения частоты повторения УКИ до субгигагерцового и гигагерцового уровня. Среди них выделяют следующие: реализация гармонической синхронизации мод, внерезонаторное увеличение частоты за счет системы оптических разветвителей, внедрение в резонатор гребенчатых частотных фильтров и увеличение основной частоты следования импульсов за счет укорочения резонатора лазера.

1.4.1. Гармоническая синхронизация мод

Гармоническая синхронизация мод (ГСМ) — это режим, при котором в резонаторе лазера распространяются несколько УКИ, с частотой, кратной основной частоте повторения импульсов, обратной времени обхода резонатора. К достоинствам данного метода можно отнести возможность получения высоких частот повторения УКИ (более 10 ГГц) и их перестройку. Однако достижение стабильности работы и повторяемости режимов, требует сложной настройки резонатора и процесс получения высоких гармоник обладает гистерезисом [71]. ПСМ в резонаторе связана с разделением основного ультракороткого импульса за счет модуляции усиления или потерь и упорядочением множества возникших импульсов за счёт их взаимного отталкивания. Это отталкивание может происходить по разным физическим причинам: через насыщающееся усиление,

дисперсионные волны, акустические эффекты и другие механизмы [72, 73, 74]. Определение конкретного типа взаимодействия импульсов для каждого лазера затруднительно, поэтому часто просто указывают тип синхронизации мод

Относительно просто ГСМ осуществляется в кольцевых резонаторах за счет нелинейного вращения плоскости поляризации. В подобных лазерах удавалось получать гармоническую синхронизацию мод с суб-гигагерцовыми и гигагерцовыми частотами повторения УКИ [75, 76, 77]. Типичная схема для данного типа лазеров изображена на рис. 7.



Рисунок 7 – Схема лазера, работающего в режиме ГСМ на основе эффекта НВПП [76]. PC – контроллер поляризации; PDI – поляризационно-зависимый изолятор; WDM – оптический мультиплексор; Coupler – волоконный разветвитель.

В работах [78, 79, 80], в которых ГСМ реализовывалась за счет углеродных нанотрубок, были зафиксированы частоты повторения УКИ 245 МГц, 170 МГц и 2,4 ГГц. А в работе [81] удалось реализовать режим ГСМ в эрбиевом волоконном лазере с частотой повторения импульсов 40 ГГц.

1.4.2. Системы умножения частоты

Прямая генерация фемтосекундных импульсов с частотой следования в несколько ГГц сталкивается с практическими трудностями. Одним из простых и

полностью оптоволоконных методов, является использование умножения частоты следования импульсов с использованием каскадных ответвителей [82, 83, 84, 85]. В работе [82] продемонстрирована типичная схема использования подобных умножителей, для увеличения частоты повторения УКИ, генерируемых эрбиевым волоконным лазером с резонатором типа «восьмерка». Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 8. Сам лазер состоял из нелинейного усиливающего кольцевого зеркала и линейного контура для рециркуляции коммутируемого импульса через нечувствительный к поляризации (PI) оптический изолятор. Зеркало состояло из несбалансированного центрального ответвителя 90:10, мультиплексора с разделением по длине волны 980/1550 (WDM), волокна, легированного эрбием (EDF) длиной 12,9 м, волокна со смещенной дисперсией длиной 9,9 м (DSF) и выходного ответвителя 70:30, подключенного к умножителю частоты повторения. Среди режимов работы лазера рассматривался только стабильный одноимпульсный режим с частотой повторения УКИ 5,68 МГц.



Рисунок 8 – Схема полностью волоконного умножителя частоты [82].

Умножитель частоты повторения состоял только из волоконных ответвителей и оптических линий задержки (DLs). Оптический импульс разделялся на два после прохождения ответвителя 3 дБ (50/50), один импульс проходил непосредственно через ответвитель, другой импульс поступал к следующему ответвителю через DL. Затем импульсы снова объединялись другим ответвителем. Очень короткие длительности импульсов и значительный дисбаланс плеч

обеспечивали отсутствие перекрытия импульсов и интерференции. Таким образом, этот метод снимает ограничения на точный контроль длины волокна в DLs. Далее объединенные импульсы снова разделялись на два во втором ответвителе и процесс повторялся. При временной задержке в DL нечетно кратной половине периода входящих импульсов, на выходных портах следующего ответвителя появлялся новый поток импульсов с удвоенной частотой повторения. В умножителе частоты повторения не использовались контроллеры поляризации И устройства поддержания поляризации, следовательно, выходные импульсы имели случайную поляризацию. В данной работе при использовании 5 DLS и 6 ответвителей в эксперименте достигалось увеличение частоты повторения в 32 раза (181,76 МГц). На рис. 9 продемонстрировано постепенное изменение частоты повторения УКИ при использовании двух и 6 ответвителей.



Рисунок 9 – Осциллограммы излучения на выходе из системы волоконных разветвителей [82]. (а) –изначальный сигнал; (b) – сигнал с удвоенной частотой повторения УКИ; (с) – увеличение частоты повторения в 32 раза.

На данных осциллограммах заметны проблемы, возникающие при использовании данного метода увеличения частоты, которые заключаются в

сложности контроля амплитуд выходных импульсов (из-за практической невозможности получения высокой точности деления светового сигнала ровно пополам и реализации одинаковых потерь в плечах) и прецизионности подбора длин линий задержки (DLs). Данные недостатки усиливаются при повышении частоты повторения импульсов, так как при достижении 10 ГГц необходимо контролировать разницу длин плеч в делителе с точностью до долей сантиметра.

1.4.3. Внедрение в резонатор гребенчатых частотных фильтров

Осуществление высокочастотной генерации УКИ так же возможно благодаря внедрению в резонатор гребенчатого частотного фильтра, который позволяет генерировать набор эквидистантных мод разность частот которых определяет время между импульсами T = 1/f, где f – разность частот между соседними модами [86]. В качестве подобных фильтров могут использоваться специальные волоконные брэгговские решетки [87], микрорезонаторы [88] или эталоны Фабри-Перо [89].

Так в работе [86] продемонстрирована возможность получения последовательностей УКИ с высокими частотами повторения за счет наличия в резонаторе эталона Фабри-Перо. На рис. 10 представлена схема эксперимента.



Рисунок 10 – Схема лазера с внутрирезонаторным эталоном Фабри-Перо [86]. СМ-оптический мультиплексор.

Оптические спектры последовательностей ультракоротких импульсов при использовании эталонов толщиной 1,8 мм (сапфировая пластинка) и 0,5 мм (пластинка из кварцевого стекла) изображены на рис. 11. Из данных спектров были вычислены частоты повторения УКИ, которые были равны 49 и 198 ГГц.



Рисунок 11 – Оптические спектры выходного излучения при использовании эталона Фабри-Перо толщиной 1,8 (а) и 0,5 мм (б) [86].

Из недостатков данного метода, продемонстрированных в работе, можно отметить то, что полученные высокочастотные последовательности импульсов не являются непрерывными, импульсы обладают низкой энергией (1 пДж), в схеме присутствуют объемные внутрирезонаторные элементы.

1.4.4. Уменьшение длины волоконных резонаторов

Так же высокая частота повторения УКИ может быть достигнута за счет значительного уменьшения длины резонатора. Этот подход часто используется для УКИ высокой основной частотой повторения и хорошей генерации С стабильностью. Лазеры с короткой длиной резонатора обычно имеют конфигурацию типа Фабри-Перо (ФП). В данных лазерах при использовании стандартных активных волокон удавалось получить сверхкороткие импульсы с частотой повторения 250 МГц [89]. Однако стандартные активные волокна обладают относительно низким коэффициентом усиления не более 0,03 дБ/см. Следовательно, их длина внутри резонатора лазера достигает нескольких десятков сантиметров, что исключает возможность достижения основной частоты повторения УКИ, значительно превышающей 100 МГц. Для решения этой проблемы в последнее время в качестве перспективного решения появились сильно легированные фосфатные волокна. Концентрацию активных ионов в этих волокнах можно увеличить на порядок, по сравнению со стандартными волокнами, так как в них не возникает эффекта кластеризации. За счет этого возможно сильно сократить длину активного волокна в резонаторе. В работе [90], используя фосфатное волокно в резонаторе типа ФП, была реализована частота повторения УКИ более 10 ГГц. Однако данные волокна плохо соединяются со стандартными оптическими компонентами и деградируют на воздухе, из-за этого возникают дополнительные внутрирезонаторным потери и ухудшается стабильность генерации лазерных систем. Основным недостатком лазеров ФП является необходимость механических соединений в резонаторах и, как следствие, наличие объемных элементов. Эти существенно снижают долговременную стабильность **удобство** факты И использования таких лазеров. На рис. 12 изображена схема лазера с коротким резонатором, работающего в режиме пассивной синхронизации мод [90]. В данной активной использовалось фосфатное работе в качестве среды волокно, легированное комплексом ионов Er/Yb, а синхронизация мод достигалась за счет наличия в резонаторе насыщающегося поглотителя SESAM.



Рисунок 12 – Схема лазера с коротким резонатором типа ФП [90].

На рис. 13 изображен выходной оптический спектр сигнала, по которому была вычислена частота повторения импульсов 12 ГГц.



Рисунок 13 – Спектр высокочастотного сигнала, полученного в лазере с коротким линейным резонатором [90].

1.4.5. Сравнительная таблица

Все предложенные ранее методы обладают своими преимуществами и недостатками. В таблице 1 показано сравнение методик получения УКИ с высокой частотой повторения.

При реализации гармонической синхронизации мод возможно получение гигагерцовых частот повторения УКИ, но зачастую подавление основной частоты не превышает 30 дБ. И несмотря на идеологическую простоту реализации данных режимов они нестабильны и сам процесс имеет гистерезисную природу, что ставит вопрос о повторяемости.

Умножители частот, как уверяют авторы данного метода, позволяют кратно увеличивать основную частоту повторения источников УКИ. Но для реализации данного метода изначально необходимо наличие лазера с хорошей стабильностью работы и высоким значением частоты повторения импульсов. Так же довольно проблематичным является прецизионный подбор линий задержки и самих используемых волоконных разветвителей, необходимые для устранения амплитудного и фазового шумов выходного сигнала.

Использование внутрирезонаторных гребенчатых фильтров позволяет реализовывать высокочастотные последовательности УКИ (с частотой повторения более 100 ГГц). Однако данные последовательности не всегда являются непрерывными и выходные импульсы имеют низкую энергию (~1 пДж).

Создание же изначально самозапускающихся источников с короткими резонаторами и высокой основной частотой повторения УКИ позволяет получать стабильно выходное излучение с большим значением отношения сигнала к шуму (> 60 дБ) и применять к ним два предыдущих подхода. Но реализация подобного типа источников осложнена доступностью необходимых материалов.

Таблица 1. Сравнение способов получения высоких частот УКИ.

Способ увеличения	Достоинства	Недостатки	
частоты повторения			
УКИ			
Гармоническая СМ	• Доступность	• Низкая стабильность	
	комплектующих	• Сложность запуска	
	• Принципиальная		
	простота		
	• Перестройка частоты		
Умножители частот	• Доступность	• Низкая стабильность	
	комплектующих	• Сложность сборки	
	• Принципиальная		
	простота		
Внедрение в резонатор	• Возможность	• Низкая энергия	
лазера гребенчатых	получения сверхвысоких	выходных импульсов	
частотных фильтров	частот повторения УКИ	• Дополнительные	
	(более 100 ГГц)	внутрирезонаторные	
		потери, за счет	
		наличия объемных	
		элементов	
Укорочение	• Низкий уровень	• Доступность	
резонатора	шума	компонент	
	• Стабильность	• Сложность сборки	
	запуска	• Низкая мощность	

1.5.1. Активные световоды, легированные эрбием

Кварцевое стекло с точки зрения легирования его ионами эрбия является не очень подходящим и даже при малых концентрациях эрбия в нем начинает возникать миграция возбуждения между ионами, а это в свою очередь сильно снижает эффективность усиления. Чистое кварцевое стекло необходимо дополнительно легировать модификаторами (Al2O3, GeO2, P2O5) [91, 92, 93]. В этом случае удается уменьшить концентрационное тушение люминесценции и повысить концентрацию ионов эрбия до 0,1- 0,4 вес. % [94, 95, 96].

Увеличение концентрации активных ионов позволяет значительно уменьшить длину активного волокна в волоконном лазере. Для этих целей используют фосфатные волокна, которые позволяют легировать их ионами эрбия в концентрациях на порядок большими, чем кварцевые [97, 98].

Но оптические волокна, изготовленные на основе фосфатного стекла, имеют несколько серьезных недостатков. Они быстро деградируют на воздухе и плохо свариваются со стандартными волоконными компонентами.

1.5.2. Композитные волокна, легированные комплексом Er/Yb

Подобных недостатков лишены композитные волокна [99, 100, 101], которые состоят из сильнолегированной ионами Er фосфатной сердцевины и кварцевой оболочки. Благодаря композитной структуре они обладают высоким значением удельного усиления, не деградируют на воздухе и хорошо свариваются со стандартными оптическими компонентами. Для повышения эффективности накачки их сердцевину зачастую солегируют ионами Yb.

При изготовлении этого волокна применяется метод "стержень в трубке". В качестве исходного материала используется фосфатное лазерное стекло, легированное ионами Er/Yb. Процесс изготовления начинается с синтеза стекла с

использованием исходных материалов, таких как ErF_3 (0,75 mol%), YbF₃ (1,25 mol%), La (PO₃)₃ (11 mol%), LiF (17 mol%), B₂O₃ (12 mol%), Al₂O₃ (6 mol%) and P₂O₅ (52 mol%). Добавление оксидов бора и алюминия к фосфатному стеклу улучшает его термомеханические свойства и влагостойкость, которые становятся сравнимым с кварцевыми стеклами. Синтез стекла проводится при высоких температурах (1350°C) в платиновом тигле с индуктивным нагревом в контролируемой сухой атмосфере в течение 10 часов. Для поддержания сухой атмосферы используется дополнительный осушитель в виде пятиокиси фосфора. Синтезированное стекло имеет низкое содержание остаточных OH-групп.

Затем ИЗ объемного синтезированного стекла путем сверления И последующего травления, чтобы удалить дефекты и примеси, появляющиеся после механической обработки, формируются стержни. Эти стержни помещаются в трубки из кварцевого стекла, и сборка обрабатывается в высокотемпературной индукционной печи для получения заготовки из композитного волокна с сердцевиной, содержащей фосфоросиликатное стекло. Волоконные заготовки изготавливаются с помощью трубок из кварцевого стекла (Heraeus F300), и оптические волокна вытягиваются из этих заготовок при высоких температурах. Затем волокна покрываются защитным полимером. Потери при сварке с таким волокном не превышают 1 дБ, поглощение на длине волны накачки (975 нм) составляет около 1000 дБ/м, а удельное усиление слабого сигнала в полуторамикронном диапазоне на порядок выше, чем у стандартных кварцевых волокон. В таблице 2 представлена сравнительная таблица стандартного, фосфатного и композитного волокон.
	Стандартное Er	Фосфатное Er	Композитное
	волокно	волокно	Er/Yb волокно
Удельное	0,01-0,03	~1	~1
усиление, дБ/см			
Концентрация	10 ¹⁹	$2*10^{20}$	10 ²⁰
ионов эрбия, см-3			
Нелинейный	~1	~20	~20
параметр ү,			
$Bт^{-1}$ ·км ⁻¹			
Возможность	+	+ (-)	+
сварки со			
стандартными			
волоконными			
компонентами			
Деградация	-	+ (-)	-
волокон			

Таблица 2 – Сравнение стандартного, фосфатного и композитного волокон.

Выводы к главе 1

Обзор литературы показал, что исследования в области генерации ультракоротких импульсов (УКИ) актуальны, и над данной проблемой работает значительное число научных групп из различных стран. Основными методами достижения данной цели являются: реализация режима гармонической синхронизации мод (ГСМ), увеличение основной частоты повторения УКИ, внерезонаторное умножение частоты и использование гребенчатых частотных фильтров. Несмотря на то, что уже продемонстрированы системы способные генерировать гигагерцовые последовательности УКИ, существует большой интерес в улучшении таких параметров, как их долговечность, компактность, стабильность, эффективность и простота настройки. С этой целью проводятся работы по исследованию способов повышения стабильности работы И повторяемости режимов ГСМ. Создаются компактные полностью волоконные гибридные компоненты. На смену стандартным кварцевым и сильнолегированным фосфатным волокнам приходят специальные композитные, легированные как отдельно ионами Er, так и комплексами Er/Yb. Это позволяет существенно сокращать длины резонаторов лазеров. Так же выглядит перспективным использование пленок ОУНТ для осуществления генерации УКИ из-за простоты их использования и положительного влияния на стабильность работы режимов и самозапуск лазера. Подобное улучшение характеристик лазеров благоприятно сказывается на их использовании в качестве задающих генераторов (ЗГ) для внерезонаторных умножителей частот следования импульсов.

Таким образом можно выделить следующие научные проблемы в данной области:

1. Не определена возможность совместного использования композитного волокна и насыщающегося поглотителя в виде ОУНТ для создания источников УКИ.

2. Недостаточно изучены оптические свойства композитных волокон, легированных комплексом ионов Er/Yb, такие как поглощение, усиление слабого сигнала, возможность усиления импульсного сигнала, дисперсия. Исследование данных характеристик поможет в определении минимально возможных длин данного волокна в лазерах необходимых для получения режимов генерации УКИ.

3. Отсутствует понимание предельных значений в укорочении длины резонатора и улучшения шумовых характеристик выходного сигнала полностью волоконного лазера, созданного на основе композитного волокна, компактных гибридных волоконных элементов и ОУНТ.

38

Глава 2. Исследование оптических свойств композитных волокон и одностенных углеродных нанотрубок

Активные оптические волокна обладают рядом ключевых оптических характеристик, определяющих их эффективность в лазерных и усилительных системах, которые зависят от материала волокна и типа легирующей примеси:

1. Коэффициент поглощения показывает, насколько эффективно волокно поглощает световую энергию на определённых длинах волн, что важно для оптимальной накачки активных ионов.

2. Коэффициент усиления отражает способность волокна усиливать оптический сигнал при наличии накачки, определяя эффективность преобразования энергии накачки в полезный сигнал.

3. Спектральный диапазон усиления определяет диапазон длин волн, в котором волокно способно эффективно усиливать сигнал, что важно для выбора волокна для конкретных задач.

4. Дисперсия влияет на распространение световых импульсов и сильно влияет на их временные характеристики.

2.1. Исследование спектров поглощения композитного волокна

Основным методом, определяющим спектр усиления и поглощения является спектроскопический, требующий наличие широкополосного источника света и анализаторов спектра, работающих в широком оптическом диапазоне.

Оптическая схема экспериментальной установки для определения спектров поглощения композитного волокна представлена на рис. 14. Излучение от лампы (широкополосного источника света) вводилось в активное композитное волокно, легированное комплексом Er/Yb (концентрации ионов Er 1,1·10²⁰ см⁻³ и Yb 1,5·10²⁰

39

см⁻³) через одномодовое волокно (SMF) и спектр выходного излучения регистрировался оптическим анализатором спектра Yokogawa AQ6370D.



Рисунок 14 – Схема экспериментальной установки для определения спектра поглощения активного волокна.

Для определения поглощения использовалось активное волокно длиной 1 см. Малое значение длины связано с высоким поглощением на длине волны 980 нм изза высоких концентраций активных ионов. Из спектра лампы (базовая линия) вычитался спектр пропускания при наличии активного волокна. В результате нами был получен спектр поглощения одного сантиметра Er/Yb волокна (рис. 15). В данных измерениях использовался оптический анализатор спектра с разрешением 1 нм.



Рисунок 15 – Спектр поглощения одного сантиметра композитного волокна.

На данном графике показано, что поглощения на длинах волн 975 и 1535,6 нм составляют 1860 и 355 дБ/м, соответственно. Данные значения на порядок выше, чем у стандартных волокон, легированных ионами эрбия и иттербия. Стоит так же отметить, что на графике заметна периодическая модуляция, которая связана с несовпадением апертур SMF волокна и активного. Из-за этого при помещении данной структуры (SMF + активное волокно + SMF) в резонатор лазера, возможно формирование спектрального фильтра.

1.2. Исследование усиления

Для определения коэффициента усиления слабого сигнала в композитном оптическом волокне нами был изготовлен эрбиевый источник усиленного спонтанного излучения. Схема данного источника изображена на рис. 16. Стандартное волокно длиной 3 м, легированное ионами эрбия накачивалось через оптический мультиплексор (WDM 980/1550@нм). Для предотвращения распространения излучения накачки на выходе из активного волокна был установлен оптический изолятор (потери излучения на длине волны накачки при прохождении излучения в прямом направлении через изолятор превышали 40 дБ).



Рисунок 16 – Схема источника слабого сигнала (ASE), работающего в полуторамикронном оптическом диапазоне.

На рис. 17 изображены спектры ASE при различных выходных мощностях. Данные выходные мощности ASE были выбраны с целью определения усиления сигнала равной мощности в широком диапазоне от 1520 до 1560 нм.



Рисунок 17 – Выходные спектры ASE при различных выходных мощностях.

Далее сигналы от ASE подавались на оптический усилитель, созданный на основе 18 см композитного Er/Yb волокна. Ввод и вывод сигнала и накачки осуществлялся через оптические мультиплексоры (WDM 980/1550 нм). Накачка осуществлялась лазерным диодом на длине волны 976 нм. Схема усилителя показана на рис. 18. Были получены выходные мощности 6,18 и 17,9 мВт, соответственно. На рис. 19 представлены спектры усиленных сигналов от ASE при входных мощностях 0,531 и 3,24 мВт. Мощность накачки усилителя была равна 160 мВт. При дальнейшем увеличении мощности накачки наблюдалось насыщение активного волокна.



Рисунок 18 – Схема усилителя на основе композитного волокна.



Рисунок 19 – Спектры усиления ASE в композитном волокне.

Таким образом интегральное удельное усиление слабого сигнала с учетом потерь на оптических мультиплексорах (0,1 дБ) в данном волокне превышает 60 дБ/м. Данные значения немного превышают характеристики усиления композитного волокна, легированного только ионами эрбия [111]. При увеличении длины активного волокна наблюдалось экспоненциальное увеличение выходной мощности (при достижении насыщения).

1.3. Исследование усиления УКИ в композитном волокне

Так же были проведены эксперименты по усилению УКИ в композитном Er/Yb волокне, при однопроходной и двухпроходной схемах (рис. 20 и 23).



Рис. 20. Схема усиления УКИ (однопроходная). ЗГ-Задающий генератор; ЛД – лазерный диод.

В качестве задающего генератора (ЗГ) использовался эрбиевый источник УКИ с частотой повторения 92 МГц (средняя выходная мощность 0,81 мВт, центральная длина волны 1553,2 нм, длительность импульсов 350 фс). Спектр излучения ЗГ изображен на рисунке 21.



Рисунок 21 – Спектр задающего генератора.

Сигнал от данного источника после прохождения циркулятора и оптического мультиплексора усиливался в активном волокне, которое накачивалось полупроводниковым диодом (максимальная мощность 679 мВт). Максимальное интегральное усиление импульсной части спектра (с учетом потерь на

компонентах) 7,31 дБ было получено при длине активного волокна 30,3 см (при мощности диода накачки 679 мВт). Спектр и мощность сигнала фиксировались на выходе из изолятора (рис. 22 (а), (б)).



Рисунок 22 – Мощность сигнала на выходе из усилителя (а) и спектр (б) при однопроходном усилении.

Далее из схемы убрали изолятор и к торцу оптического коннектора прикрепили алюминиевую фольгу, которая обеспечивала отражение 90% (рис. 23). В данном случае сигнал дважды усиливался в активном волокне и фиксировался на выходе 3 циркулятора.



Рисунок 23 – Схема усиления УКИ при двойном проходе сигналом композитного волокна. ЗГ – задающий генератор; ЛД – лазерный диод.



Рисунок 24 – Мощность сигнала на выходе из усилителя (а) и спектральные характеристики (б) при двухпроходном усилении.

Значения выходной мощности сигнала при увеличении уровня накачки показаны на рис. 24 (а). В данном случае в спектре выходного сигнала наблюдалось возникновение шумовых компонент высокой интенсивности в коротковолновой части спектра (рис. 24 (б)). С учетом потерь на компонентах схемы максимальное интегральное усиление (в области спектра, относящейся к УКИ) было равно 7,9 дБ.

Таким образом была продемонстрирована возможность усиления импульсного излучения в композитном волокне.

2.4. Параметр дисперсии групповых скоростей

Одним из наиболее значимых параметров лазера, определяющим характер возможных режимов генерации, является общая дисперсия групповых скоростей (ДГС) резонатора:

$$\beta_{2L} = \sum_{i}^{M} \beta_{2i} \cdot L_i \tag{7}$$

где β_{2i} и L_i – ДГС и длина отдельного оптического волокна, М – количество отрезков волокон одного типа, составляющих резонатор лазера.



Рисунок 25 – Пример оптического спектра УКИ с пронумерованными пиками Келли.

Определить β_{2L} возможно из анализа пиков Келли (рис. 25), которые могут возникать в спектре УКИ в результате интерференции импульсов с дисперсионной волной [102, 103, 104, 105].

Для получения выражения определяющего положения пиков Келли относительно центральной частоты спектра изначально необходимо разложить в ряд Тейлора постоянную распространения дисперсионной волны вблизи несущей частоты:

$$\beta_d(\omega) = n(\omega)\frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\Delta\omega) + \frac{1}{2}\beta_2\Delta\omega^2 + \frac{1}{6}\beta_3\omega^3 + \cdots$$
(8)

где β_2 - параметр групповой скорости, β_3 – параметр дисперсии третьего порядка на единицу длины волны, $\Delta \omega \equiv \omega - \omega_0$ – смещение частоты от центральной ω_0 . Если мы пренебрежём влиянием дисперсии третьего порядка, то постоянная распространения для солитона длительностью τ_0 принимает вид [102]:

$$\beta_s(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\Delta\omega) - \frac{1}{2}\beta_2\tau_0^{-2}$$
(9)

Тогда условие резонанса для солитона и дисперсионной волны выглядит следующим образом:

$$2\pi N = \varphi_s - \varphi_d = L(\beta_s - \beta_d) \tag{10}$$

из этого следует выражение для зависимости номера пика Келли от суммарной дисперсии резонатора ($\beta_{2L} = L\beta_2$):

$$N = -\frac{1}{4\pi} L\beta_2 \Delta \omega_N^2 - \frac{1}{12\pi} L\beta_3 \Delta \omega_N^3 + C$$
(11)

где N – номер пика, $\Delta \omega_N^2$ – квадрат разницы положения N-ого пика Келли и центрального.

Таким образом из анализа положения пиков Келли в спектре УКИ возможно определение общей дисперсии групповых скоростей резонатора. Так же возможно определение неизвестных величин дисперсии компонент входящих в резонатор. Для определения параметра дисперсии нашего композитного волокна был собран кольцевой лазер, работающий в режиме синхронизации мод (рис. 26). Для уменьшения ошибки расчетов резонатор лазера образован всего двумя типами волокон (SMF 28 и композитное Er/Yb волокно). Активная среда лазера представлялась композитным волокном, легированным комплексом ионов Er/Yb, длина которого составляла 0,25 м. Накачка производилась диодом на длине волны 976 нм и вводилась в резонатор через оптический гибрид (WIT), играющий роль мультиплексора, изолятора и делителя (10%). Резонатор представлял собой кольцо, длина которого регулировалась, посредством изменения длины волокна SMF28. Для получения СМ использовались ОУНТ. Настройка режимов генерации проводилась с помощью контроллера поляризации КП.

48



Рисунок 26 – Схема кольцевого волоконного лазера для определения параметра дисперсии композитного волокна.

Было реализовано несколько одноимпульсных режимов генерации УКИ при различных длинах пассивной части резонатора (от 4,44 до 7,56 м) и проведен анализ спектров выходного сигнала (для определения значения параметра дисперсии, используемого волокна SMF28).

Начальная длина резонатора составляла 4,7 м, длина SMF28 4,45 м, длина активного волокна 0,25 м. При накачке 234 мВт был получен режим генерации УКИ с пиками Келли (рис. 27 (а)), с частотой следования импульсов 44 МГц. Центральная длина волны составляла 1543,5 нм. На основе формулы (11) была выполнена аппроксимация положения пиков Келли (рис. 27 (в)):

$$N = A\Delta\omega_N^2 + B\Delta\omega_N^3 \tag{12}$$

где параметры А и В:

$$A = -\frac{1}{4\pi} L\beta_2 \tag{13}$$

$$B = -\frac{1}{12\pi} L\beta_3 \tag{14}$$

Откуда из параметра A нами было вычислено значение параметра β₂L, которое составило 0,096 пс².

Затем было добавлено 3 м волокна SMF28 (длина резонатора составила 7,8 м). При мощности накачки 240 мВт был также получен стабильный режим генерации УКИ с частотой следования 26,3 МГц. Оптический спектр представлен на рис. 27 (б) (длина волны 1543,6 нм). Аппроксимация положений пиков Келли изображена на рис. 27 (г). Значение β₂L для данного режима составило 0,162 пс². Параметры резонатора, полученных режимов и вычисленные значения дисперсий волокон SMF28 и активного композитного указаны в таблице 3.



Рисунок 27 – Спектры и зависимости порядка пиков Келли от разницы частот N-го пика и центрального (Δω_N). а) и в) до добавления SMF, б) и г) после добавления SMF.

Таблица 3. Параметры резонатора, полученных режимов и вычисленные значения дисперсий волокон SMF28 и активного композитного.

Параметры	1	2
Р _{іп} , мВт	235	240
ν, ΜΓц	44	26,3
L, м	4,7	7,8
L _{SMF28} , M	4,44	7,56
L _{Er/Yb} , M	0,25	0,25
$β_{2L}$, πc ²	- 0,096	- 0,162
β _{2SMF28} , пс ² /км	-	21,1
$β_{2Er/Yb}$, πc ² /км		- 9,2
Центральная	1543,5	1543,6
длина воны		
излучения		

Как можно заметить, при изменении длины пассивного волокна не было смещения центральной длины волны сигнала, следовательно не наблюдалось изменений в определенных параметрах дисперсии для SMF волокна (β_{2SMF28} = - 21,1 nc²/км). Определенные параметры хорошо согласуются с литературными. Из проведенных экспериментов был вычислен параметр дисперсии групповых скоростей композитного Er/Yb волокна (- 9,2 nc²/км). Отрицательное значение указывает на то, что в данной спектральной области дисперсия данного волокна является аномальной. Следовательно данное волокно возможно использовать для реализации лазерных систем генерирующих солитоны, без использования протяженных одномодовых волокон.

2.5. Глубина модуляции ОУНТ

В лазерах с коротким резонатором, работающем в режиме синхронизации мод за счет наличия насыщающегося поглотителя (НП), одним из важнейших параметров, влияющих на генерацию, является глубина модуляции НП. Для определения глубины модуляции ОУНТ был проведен эксперимент, схема которого изображена на рис. 28. ОУНТ были синтезированы методом CVD [112, 113]. Пленки ОУНТ переносились с фильтра на подложку простым методом сухого переноса [114, 115].



Рисунок 28 – Схема измерения глубины модуляции ОУНТ. АОС – анализатор оптического спектра. ПК – персональный компьютер.

Излучение от источника УКИ (Задающий генератор) проходило через эрбиевый усилитель и подавалось на аттенюатор, благодаря которому была возможность изменять пиковую мощность УКИ (длительность импульсов 1,2 пс) в диапазоне от 10 мВт до 20 Вт. Далее сигнал делился волоконным разветвителем (50/50) на два оптических канала и подавался на анализаторы оптического спектра большим (AOC1, AOC2).Данные анализаторы обладали динамическим диапазоном (65дБ) и хорошей линейностью по мощности. В первом канале находился исследуемый образец ОУНТ толщиной ~ 60 нм. Управление аттенюатором и одновременный съем оптических спектров осуществлялись с помощью персонального компьютера. С этой целью на языке программирования python было изготовлено программное обеспечение синхронного для многоканального сбора данных.

Были проведены измерения, в которых в автоматическом режиме происходило изменение пиковой мощности на выходе из аттенюатора и одновременная фиксация спектров на выходах 1 и 2. Анализаторы спектра использовались для возможности измерения малых мощностей. Оба АОС при измерениях имели одинаковые значения разрешения 1 нм и чувствительности High1 (-90 дБм). Максимальная интегральная мощность, подаваемая на входы анализаторов, не превышала 1 мВт, при меньших мощностях вносимые потери на входах АОС не изменялись. Спектры на выходах из каналов при изменении пиковых мощностей УКИ в диапазоне от 5 мВт до 53 Вт изображены на рис. 29 (а) и (б).



Рисунок 29 – Фиксируемые спектры излучений на выходах 1 и 2 при изменении пиковой мощности излучения на выходе из аттенюатора (вносимых потерь).



Рисунок 30 – Регистрируемые зависимости средней мощности на выходах 1 (а) и 2 (б) от подаваемых в каналы пиковых мощностей.

Зависимости мощностей на выходах 1 и 2 от пиковых мощностей УКИ изображены на рис. 30 (а) и (б). Данные значения вычислялись путем интегрирования спектров излучения.

Определить нелинейность потерь, во втором канале (за счет наличия в нем ОУНТ) возможно благодаря отношению выходных мощностей (рис. 30. (а) и (б)). Данная зависимость изображена на рис. 31. Она была бы линейной в отсутствии насыщающегося поглотителя. Для определения параметров насыщающегося поглотителя необходимо рассмотреть зависимости, фиксируемых анализаторами оптических спектров мощностей:

$$P_{out1} = P_{in}T_1T_2(P_{in})T_3$$
(15)

$$P_{out2} = P_{in}T_4T_5, (16)$$

где P_{out1} и P_{out2} - измеренные мощности на выходах из первого и второго каналов, P_{in} — мощность на выходе из аттенюатора, T_1 и T_4 — пропускания волоконного разветвителя, $T_2(P_{in})$ — функция пропускания ОУНТ, зависящая от подаваемой на них мощности, T_3 и T_5 — пропускания связанные с уменьшениями мощности на входах в АОС1 и АОС2, соответственно. Отношение фиксируемых мощностей:

$$\frac{P_{out1}}{P_{out2}} = T_1 T_2(P_{in}) T_3$$
(17)

функция пропускания ОУНТ имеет следующий вид [106]:

$$T_2 = 1 - \alpha_{s0} \left(1 + \frac{P_{in}}{P_s} \right)^{-1} - \alpha_{ns}$$
(18)

 α_{s0} – глубина модуляции ОУНТ, P_s – мощность насыщения и α_{ns} ненасыщаемые потери. Подставляя (18) в (17), получается следующее выражение:

$$\frac{P_{out1}}{P_{out2}} = T_1 (1 - \alpha_0 \left(1 + \frac{P_{in}}{P_s}\right)^{-1} - \alpha_{ns}) T_3$$
(19)

Или

$$y = A(1 - B - C\left(1 + \frac{x}{D}\right)^{-1})$$
(20)

Где A = T_1T_3 , B = α_{ns} , C = α_{s0} , D = P_s , y = $\frac{P_{out1}}{P_{out2}}$, x = P_{in} . В результате аппроксимации зависимости отношения фиксируемых мощностей ($\frac{P_{out1}}{P_{out2}}$) от пиковой мощности ультракоротких импульсов на выходе из аттенюатора (P_{in}) были определены параметры A, B, C, D, значения которых указаны в таблице 4. Также в ней указаны используемые начальные приближения.

Таблица 4. Значения параметров аппроксимации.

Параметр	Изначальное	Определенное значение	
	приближение		
А	1	$0,98 \pm 0,02$	
В	0,05	$0,102 \pm 0,004$	
С	0,05	$0,035 \pm 0,002$	
D	5	$4,42 \pm 0,22$	



Рисунок 31 – Зависимость пропускания канала 2 от подаваемой пиковой мощности УКИ.

Вычисленные значения параметров насыщающегося поглотителя указана в таблице 5.

Таблица 5.	Па	раметі	зы иссле	ічемого	насышаюш	егося	поглотителя	(ОУНТ	7).
тастица ст			, DI II • • • • •	,	пасыцающ	,	1101010 1111 0001	(• • • • •	· /•

Параметр	Значение
α_{ns}	$0,102 \pm 0,004$
α_{s0}	$0,035 \pm 0,002$
P _s	$4,42 \pm 0,22 \text{ Bt}$

Таким образом была проведена оценка оптических параметров, используемых образцов одностенных углеродных нанотрубок. Данные параметры хорошо согласуются с данными из литературы [107]. Из проведенных использования исследований следует, ЧТО для данного насыщающегося поглотителя в качестве элемента, обеспечивающего пассивную синхронизацию мод достаточно слоя толщиной ~ 60 нм.

56

Выводы по 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 данным 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 интегральное усиление слабого сигнала составляет 60 дБ/м (в спектральном диапазоне от 1520 до 1560 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. Так же был определен параметр дисперсии групповых скоростей для данного волокна (длина волны 1543,5 нм), который составлял -9,2 пс²/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 $\alpha_{s0} > 0,02$ и $P_s \sim 5$ Вт. Таким образом для генерации УКИ возможно использование одного слоя ОУНТ толщиной ~60 нм.

57

2. Линейные лазеры на основе композитного волокна и одностенных углеродных нанотрубок

В данной главе представлены лазеры с линейным типом резонатора. Продемонстрирована возможность существенного увеличения основной частоты повторения импульсов при замене стандартного активного волокна на композитное и использовании для реализации пассивной синхронизации мод ОУНТ. Продемонстрировано постепенное увеличение основной частоты следования импульсов (за счет уменьшения длины резонатора лазера).

3.1. Эрбиевый лазер с гантелевидной схемой резонатора

Изначально в работе [109] было проведено исследование эрбиевого волоконного лазера с линейным гантелевидным резонатором (рис. 32).



Рисунок 32 – Схема эрбиевого лазера с линейным (гантелевидным резонатором). КП – контроллер поляризации, ПД – поляризационный делитель.

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 (ЭВ№1, поглощение на длинах волн 975 нм и 1535 нм были равны 10 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. Различные соотношения между добротностью резонатора и поляризацией излучения внутри него, которые необходимы для реализации пассивной синхронизации мод, позволяли достигать различных режимов генерации ультракоротких импульсов.

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. 33 (б)) на центральной длине волны излучения 1554 нм (рис. 33 (г)). Отношение сигнала к шуму в данном случае превышало 60 дБ (рис. 33 (в)), а выходная мощность была равна 0,6 мВт. При повышении мощности накачки до 27 мВт и подстройке поляризации лазер переходил в режим генерации троек импульсов с расстояниями между ними 20 нс (рис. 34 (а)). При этом центральная длина волны излучения смещалась в длинноволновую область (рис.33 (б)), а выходная мощность была равна 2,3 мВт.



Рисунок 33 – Осциллограмма сигнала – (а); Автокорреляционная функция – (б); Радиочастотный спектр - (в); Оптический спектр - (г).



Рисунок 34 – Последовательность импульсов (а) и спектр сигнала (б) при генерации троек импульсов.

Дальнейшее увеличение мощности накачки приводило к пакетной генерации УКИ. Средняя частота повторения импульсов в пакетах была равной ~ 500 МГц (рис. 35 (а)). Оптический спектр сигнала изображен на рис. 35 (б).



Рисунок 35 – Осциллограмма и оптический спектр сигнала при пакетной генерации лазера.

Несмотря на высокую частоту повторения импульсов внутри пакета их амплитуды существенно варьировались и повторяемости количества импульсов не наблюдалось.

3.2. Замена стандартного эрбиевого волокна на композитное, использование ОУНТ для синхронизации мод

Далее были проведены эксперименты по получению режима синхронизации мод в эрбиевом волоконном лазере с гантелевидной схемой резонатора при замене стандартного активного волокна на композитное и использовании насыщающегося поглотителя. Это позволило существенно сократить длину резонатора и увеличить основную частоту повторения УКИ (рис. 36). Накачка 10 см композитного волокна, легированного ионами Er, осуществлялась через мультиплексор (WDM) на длине волны 976 нм. Концентрация ионов эрбия в волокне была оценена как N \approx 1,6 \times 10²⁰ см⁻³. Более подробную информацию об этом волокне можно найти в работе [110]. В качестве зеркал резонатора использовались оптические делители, замкнутые с одной стороны (волоконный разветвитель 50/50 зеркало высоким с коэффициентом отражения; разветвитель 90/10 – частично прозрачное зеркало). Пассивную синхронизацию мод обеспечивали помещенные между двумя оптическими разъемами FC/APC бесполимерные плёнки синтезированных в

аэрозоле одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ). Подстройка режимов генерации осуществлялась с помощью поворотно-нажимного контроллера поляризации (КП). Данная схема резонатора обладает несколькими преимуществами: простота, дешевизна компонент, отсутствие интегральных устройств.



Рисунок 36 – Схема эрбиевого лазера с гантелевидным резонатором (длина резонатора 2,15 м). ОУНТ - помещенные между двумя оптическими разъемами одностенные углеродные нанотрубки, КП – контроллер поляризации, WDM – оптический мультиплексор.

С помощью данной схемы при мощности накачки 120 мВт удалось получить режим пассивной синхронизации мод с основной частотой повторения импульсов 47 МГц. Наблюдался самозапуск режима. Средняя выходная мощность излучения в данном случае составляла 2,38 мВт. Временные и спектральные характеристики выходного излучения изображены на рис. 37.



Рисунок 37 – Последовательность импульсов (слева) и спектр (справа) излучения на выходе эрбиевого лазера с гантелевидным резонатором.

На рис. 38 изображены автокорреляционная функция и радиочастотный спектр. Длительность импульса в данном случае составляла 647 фс.



Рисунок 38 – Автокорреляционная функция (слева) и радиочастотный спектр (справа) излучения на выходе эрбиевого лазера с гантелевидным резонатором, работающего в режиме синхронизации мод.

Таким образом была подтверждена возможность реализации источников ультракоротких импульсов на основе композитного волокна и ОУНТ.

3.3. Замена кольцевого зеркала на широкополосное

Далее была осуществлена попытка получения импульсной генерации в лазере при замене одного из кольцевых зеркал на широкополосное (рис. 39). Широкополосное зеркало было реализовано в виде алюминиевой фольги, закрепленной на торце оптического коннектора. Оно обеспечивало отражение порядка 90%. За счет данной замены длина резонатора сократилась до 1,77 м. Длина активного волокна не изменялась.



Рисунок 39 – Схема эрбиевого лазера с резонатором, образованным широкополосным алюминиевым и петлевым зеркалами.

Используя данную схему лазера, при мощности накачки 130 мВт, удалось получить импульсную генерацию на частоте 57 МГц. Осциллограмма излучения показана на рис. 40 слева. Мощность излучения составляла 3 мВт. Также наблюдался самозапуск режима при определенной мощности накачки. Спектральные характеристики выходного излучения изображены на рисунке 40 справа.



Рисунок 40 – Осциллограмма (слева) и спектр (справа) излучения на выходе эрбиевого лазера с резонатором, образованным широкополосным алюминиевым и петлевым зеркалами.

Из автокорреляционной функции (рис. 41 слева) длительности импульсов оценивались в 670 фс. На рисунке 41 справа изображен радиочастотный спектр, на котором показано, что частота следования импульсов была равна 57 МГц.



Рисунок 41 – Автокорреляционная функция (слева) и радиочастотный спектр (справа) излучения на выходе эрбиевого лазера с резонатором, образованным широкополосным алюминиевым и петлевым зеркалами.

Для проверки стойкости широкополосного зеркала был проведен эксперимент по проверке порога его разрушения. Схема эксперимента изображена на рис. 42. Излучение от источника ультракоротких импульсов (частота следования была равной 50 МГц, а длительность ~700 фс) усиливалось в эрбиевом усилителе. После усиления сигнал подавался через оптический циркулятор на широкополосное зеркало. Мощность отраженного сигнала регистрировалась измерителем мощности.



Рисунок 42 – Принципиальная схема эксперимента определения коэффициента отражения зеркала и его стойкости. ЗГ – Импульсный эрбиевый лазер; У – эрбиевый усилитель.

Таким образом был вычислен коэффициент отражения зеркала ~90%, который не изменялся при повышении мощности излучения, подаваемого на зеркало до 70 мВт. Этого достаточно для использования данной системы в качестве зеркала в резонаторе лазера.

3.4. Нанесение ОУНТ на широкополосное зеркало

Далее была осуществлена попытка получения импульсной генерации в лазере при нанесении ОУНТ между торцом оптического коннектора и алюминиевой фольгой (рис. 43).



Рисунок 43 – Схема эрбиевого лазера с ОУНТ, нанесенными между торцом оптического коннектора и алюминиевой фольгой.

В этом случае удалось уменьшить длину резонатора до 1,26 м и при мощности накачки 110 мВт получить генерацию с частотой следования импульсов 80 МГц. Средняя мощность излучения составляла 2,68 мВт. Осциллограмма и оптический спектр выходного излучения изображены на рис. 44.



Рисунок 44 – Осциллограмма (слева) и спектр (справа) излучения на выходе эрбиевого лазера с резонатором, образованным широкополосным алюминиевым и петлевым зеркалами.

На рис. 45 изображены автокорреляционная функция и радиочастотный спектр, соответственно. Длительность импульса в данном случае составляла 522 фс.



Рисунок 45 – Автокорреляционная функция (слева) – и радиочастотный спектр (справа) излучения на выходе эрбиевого лазера с резонатором, образованным широкополосным алюминиевым и петлевым зеркалами.

3.5. Осуществление накачки композитного волокна через оптический мультиплексор и разделитель

Используя схему лазера, изображенную на рис. 43 уменьшение длины резонатора осложнено наличием протяженного кольцевого (частично прозрачного) зеркала. Поэтому вместо него стало использоваться широкополосное зеркало (ШЗ), WDM был вынесен из резонатора и заменен на волоконный разветвитель с коэффициентом деления 50/50. Экспериментально был определен коэффициент деления для излучения на длине волны накачки (76/24). 76 процентов излучения вводилось в резонатор. Схема лазера изображена на рис. 46. Длина резонатора в данном случае была равной 1,6 м.



Рисунок 46 – Схема лазера с двумя широкополосными зеркалами и накачкой через WDM и волоконный разветвитель.

Стабильный режим в данной конфигурации был получен при мощности накачки 330 мВт.



Рисунок 47 – Автокорреляционная функция (а) и радиочастотный спектр (б) сигнала.

Лазер генерировал УКИ с частотой повторения 65 МГц (радиочастотный спектр изображен на рис. 47 (б)) на центральной длине волны излучения 1561 нм (рис. 48 (б)). Выходная мощность излучения и длительности импульсов (рис. 47 (а)) составляли 3,6 мВт и 366 фс, соответственно.



Рисунок 48 – Последовательность импульсов (а) и спектр (б).

3.6. Оптимизация длины линейного резонатора

Убирая, из резонатора лазера контроллер поляризации и уменьшая длину всех компонентов, образующих лазер, удалось получить резонатор минимальной длины 0,67 м. Схема лазера изображена на рис. 49 [115].



Рисунок 49 – Схема эрбиевого волоконного лазера, работающего в режиме пассивной синхронизации мод. ШЗ1 – широкополосное зеркало; ШЗ2 + ОУНТ соединённые оптические коннекторы, между которыми находятся нанотрубки (ОУНТ) и алюминиевая фольга. Длина резонатора 0,67 м.

В данной конфигурации резонатора режим генерации УКИ (СМ) 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. 50. Ширина спектра на полувысоте составляла 3 нм.



Рисунок 50 – Спектр сигнала при частоте повторения УКИ 150 МГц.

Были получены УКИ с частотой следования 150 МГц при средней выходной мощности 6 мВт. Радиочастотный спектр и автокорреляционная функция сигнала представлены на рис. 51 (а) и (б), соответственно.



Рисунок 51 – Радиочастотный спектр (а) и автокорреляционная функция (б) сигнала.

Отношение сигнал/шум превышало 50 дБ. Измеренная длительность импульса, равная 973 фс, соответствовала произведению времени на ширину спектра (в частотах) равному 0,34, что указывает на незначительную частотную модуляцию импульсов.

Выводы по главе 3

Были реализованы эрбиевые лазеры с короткими линейными резонаторами на основе композитного волокна, в которых СМ происходила благодаря наличию ОУНТ. По мере уменьшения общей длины резонатора были получены стабильные режимы генерации УКИ с частотами повторения от 47 до 150 МГц. При максимальной частоте повторения длина резонатора составляла 0,67 м. Стоит отметить наличие самозапусков режимов и высокие значения отношения сигнала к шуму (S/N) > 50 дБ. При этом выходная мощность и длительности импульсов составляли 6 мВт и 973 фс, соответственно. Была показана возможность использования простой структуры в виде зажатых между двумя оптическими коннекторами алюминиевой фольги и пленки ОУНТ в качестве насыщающегося поглотителя и широкополосного зеркала.

Таким образом была продемонстрирована возможность создания источников УКИ с линейным резонатором в широком диапазоне частот повторения импульсов. Дальнейшее увеличение частоты в исследуемых схемах осложнено ограниченностью минимальной длины волокна необходимой для осуществления сварных соединений и двухпроходным характером формирования генерации. Так же стоит отметить сложность в осуществлении накачки, что существенно уменьшает эффективность лазерной системы целиком. Таким образом реализация основной частоты повторения импульсов более 200 МГц на данной компонентной базе невозможна.

72
4. Лазеры с кольцевыми резонаторами. Генерация ультракоротких импульсов с субгигагерцовыми и гигагерцовыми частотами повторения

Несмотря на все преимущества линейных схем резонаторов лазеров сверхкоротких импульсов с высокой частотой повторения в них зачастую присутствуют громоздкие элементы, что усложняет процесс настройки и поддержания стабильности работы режима лазера. В предыдущих экспериментах так же стоит отметить сложность осуществления накачки и вывода излучения генерации из резонатора. Из-за этих проблем дополнительно увеличиваются внутрирезонаторные потери. Кольцевые лазеры проще в плане реализации, управления и поддержания стабильности работы. Кольцевые в плане реализации, управления и поддержания стабильности работы. Кольцевой волоконный лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод, обычно включает в себя следующие компоненты: мультиплексор (WDM), изолятор и ответвитель. В большинстве работ именно в кольцевых резонаторах осуществляется режим гармонической синхронизации мод для получения высоких частот повторения УКИ [116, 117, 118, 119].

4.1. Получение гигагерцовых частот повторения УКИ в кольцевом резонаторе за счет реализации гармонической синхронизации мод

Изначально в работе [120] были проведены исследования гармонической синхронизации мод в эрбиевом волоконном лазере с кольцевой схемой А резонатора (рис. 52), получаемой за счет эффекта НВПП.



Рисунок 52 – Схема А эрбиевого волоконного лазера с кольцевым резонатором. КП – контроллер поляризации; ПД – поляризационный делитель.

Накачка ЭВ№1 длиной 2,4 метра проводилась полупроводниковым диодом на длине волны 974 нм. Направленность генерации обеспечивалась наличием в схеме оптического циркулятора (излучение в циркуляторе распространяется из первого канала во второй и из второго в третий). Излучение из резонатора выводилось через поляризационный делитель. Для возможности подстройки режимов генерации и изменения состояния поляризации света в резонаторе присутствовало два контроллера поляризации (КП).

При мощности накачки 32 мВт начиналась генерация на основной частоте (OЧ), равной обратному времени обхода резонатора – 24 МГц. Мощность излучения на выходе в данном случае составляла 0,34 мВт. Максимальная частота в стабильном режиме генерации равная 9024 МГц (376-ая гармоника) наблюдалась при дополнительной подстройке поляризации и увеличении мощности накачки до 573 мВт. Постепенное уменьшение накачки приводило к скачкообразным уменьшениям частоты повторения УКИ кратным ОЧ, без срыва генерации. В таблице 6 представлены характеристики различных режимов работы лазера в зависимости от мощности накачки при оптимальной подстройке поляризации в резонаторе для получения высокочастотной генерации. На рис. 53 представлены

спектры излучения в зависимости от мощности накачки. Стоит отметить, что при достижении 74-ой гармоники была попытка провести обратное увеличение частоты повторения за счет увеличения накачки, но это приводило к срыву режима. Это показывает гистерезисный характер изменения номера гармоники. Из этого следует вывод о сложности мгновенного получения необходимой частоты повторения УКИ и повторяемости режимов.

Таблица 6.	Характо	еристики	режимов	при	гармонической	синхронизации	мод.
	-	-	-	-	-	-	

Мощность	Выходная	Частота	Номер
накачки, мВт	мощность, мВт	повторения	гармоники
		импульсов, МГц	
120	9,3	1776	74
182	14,82	2855	119
245	19,81	3936	164
308	24,73	4920	205
340	27,3	5496	229
371	29,6	6000	250
403	32	6576	274
434	34,1	7032	293
466	36,4	7560	315
503	38,7	8112	338
529	40,2	8640	360
548	41,3	9000	375
573	43	9024	376



Рисунок 53 – Зависимость спектров излучения от мощности накачки.



Рисунок 54 – Радиочастотный спектр (а) и последовательность импульсов (б), при мощности накачки 573 мВт.

Радиочастотный спектр сигнала на выходе из лазера изображен на рис. 54 (а). Также на рисунке 54 (б) можно наблюдать осциллограмму выходного излучения, зафиксированную с помощью осциллографа с временным разрешением менее 20 пс.

Для увеличения частоты повторения импульсов циркулятор был заменен на изолятор, таким образом внутрирезонаторные потери были уменьшены на 30

процентов (рис. 55). Основная частота повторения импульсов уменьшилась до 23 МГц. В данном случае при меньшей мощности накачки 420 мВт был получен стабильный режим генерации УКИ с частотой повторения 23 ГГц.



Рисунок 55 – Схема Б эрбиевого волоконного лазера с кольцевым резонатором. КП – контроллер поляризации; ПД – поляризационный делитель.

На рис. 56 изображены радиочастотные спектры при максимальных значениях частот следования УКИ в лазерах со схемами А и Б. В таблице 7 представлено сравнение характеристик на основной и максимальной частотах следования импульсов лазера до и после модернизации.



Рисунок 56 – Радиочастотные спектры сигналов с максимальными частотами повторения для лазера с циркулятором (А) и изолятором (Б).

Таблица 7. Сравнение режимов генерации высокочастотных последовательностей УКИ в схемах А и Б.

Схема	Мощность	Выходная	Частота	Номер
	накачки,	мощность,	повторения	гармоники
	мВт	мВт	импульсов,	
			МГц	
А	45	0,34	24	1
	573	43	9024	376
Б	39	0,2	23	1
	420	44	23253	1011

Таким образом в данной работе были получены режимы генерации с частотами повторения УКИ в диапазоне от 1,7 до 9 ГГц, а при оптимизации потерь в резонаторе при меньшей мощности накачки частота была увеличена до 23,253 ГГц.

Несмотря на высокие значения полученных частот повторения, стоит отметить, что получение данных режимов требует серьезной подстройки резонатора (настройки поляризации). Возможны скачкообразные переходы между соседними гармониками при понижении мощности накачки лазера, но их повторяемость очень низкая. Так же при высоких гармониках (высокой мощности накачки) часто происходит срыв генерации или произвольное изменение частоты повторения импульсов. Стоит так же отметить низкие шумовые характеристики сигналов при высоких гармониках (17 и 22 дБ).

4.2. Минимизация длины эрбиевого лазера с кольцевым резонатором

Как уже говорилось ранее данных недостатков можно избежать за счет высокочастотной генерации УКИ на основной частоте следования, равной обратному времени обхода резонатора, которую можно увеличить благодаря существенному сокращению длины лазера. В работе [121] использовался эрбиевый лазер с максимально укороченным кольцевым резонатором. Схема лазера изображена на рис. 57.



Рисунок 57 – Схема лазера с укороченным кольцевым резонатором на основе стандартного активного волокна, легированного ионами эрбия.

В данном лазере стандартное ЭВ№1 длиной 1,5 м (при дальнейшем укорочении волокна не наблюдалось стабильной импульсной генерации) накачивалось через оптический мультиплексор на длине волны 976 нм. Излучение поляризационный Для выводилось через делитель. осуществления однонаправленности генерации использовался оптический изолятор. Для возможности управления режимами генерации использовались два контроллера поляризации. Синхронизация мод осуществлялась за счет эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации. Общая длина резонатора составляла 2,23 м (составные элементы резонатора были максимально укорочены).

При мощности накачки 20 мВт наблюдалась стабильная генерация УКИ с основной частотой повторения 92 МГц. Лазер генерировал импульсы

длительностью 1,2 пс на центральной длине волны излучения 1529 нм (рис. 58). Выходная мощность была равна 0,265 мВт.



Рисунок 58 – АКФ (а) и оптический спектр (б) выходного сигнала эрбиевого волоконного лазера с длиной кольцевого резонатора 2,23 м.

4.3. Полностью волоконный лазер с резонатором, образованным волоконным гибридным элементом

Дальнейшее увеличение основной частоты повторения УКИ возможно благодаря замене стандартного активного волокна на композитное и использование гибридных оптических компонент. В 1997 году Лермино и Машмейер предложили концепцию интеграции WDM, изолятора и волоконного разветвителя (WIT) в одно устройство. В последние годы были разработаны компактные гибридные волоконные компоненты (WIT), которые позволяют дополнительно уменьшить длину резонатора, сохраняя полностью волоконное исполнение. Использование WIT повышает стабильность работы лазера и снижает внутрирезонаторные потери.

В работе [122] проводилось исследование лазера с кольцевым резонатором на основе гибридного элемента WIT в сочетании с композитным волокном, легированным комплексом ионов Er/Yb (EYDF). Добавление ионов Yb в сердцевину композитного волокна приводит к снижению мощности накачки необходимой для получения генерации УКИ. Для достижения режима CM в качестве насыщающегося поглотителя (SA) использовались бесполимерные тонкие

пленки из аэрозольно-синтезированных однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ). В ходе исследований впервые был успешно продемонстрирован лазер с кольцевым резонатором, на основе углеродных нанотрубок, гибридного волоконного элемента и уникального композитного волокна, в котором основная частота повторения УКИ, превышала 250 МГц.

Схема композитного EYDF-лазера представлена на рис. 59 [122]. В качестве активной среды лазера использовалось композитное волокно с сердцевиной из фосфатного стекла с высокой концентрацией ионов Er/Yb и оболочкой из кварцевого стекла. Длина активного волокна составляла 12 см. Композитное волокно накачивалось лазерным диодом на длине волны 976 нм через гибрид (WIT), который выполнял роль мультиплексора, изолятора и волоконного разветвителя. Коэффициент деления разветвителя составляла 85/15 (выход 15%). Параметры гибридного элемента указаны в таблице 8. Для достижения синхронизации мод использовалось два слоя одностенных бесполимерных углеродных нанотрубок (ОУНТ), помещенных между двумя оптическими разъемами.



Рисунок 59 – Схема эрбиевого волоконного лазера. ОУНТ – соединенные оптические разъемы с пленками ОУНТ. КП - контроллер поляризации.

T (\mathbf{n}	r		~	
	х п	1910 MATHLI	DODOVOUUOFO	FUMPUTIOFO	эпемента
таолица о	0.11		σοποκομμοι ο	тиоридного	элемента.
1		1 1		1 / 1	

Параметр	Значение
Сигнальная длина волны, нм	1530-1570
Длина волны накачки, нм	970-990
Коэффициент деления, %	15

4.4. Увеличение частоты повторения ультракоротких импульсов за счет уменьшения длины резонатора в композитном EYDF-лазере

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. 60 (а)) на центральной длиной волны излучения 1535 нм. Ширина спектра на полувысоте (FWHM) составляла 1 нм (рис. 60 (б)). Выходная мощность составляла 0,48 мВт.



Рисунок 60 – Автокорреляционная функция (а) и оптический спектр (б) выходного сигнала (при длине резонатора 1.93 м).

При уменьшении длины резонатора также были получены устойчивые режимы генерации с частотами повторения УКИ 129 МГц (длина резонатора Lr = 1,54 м), 153 МГц (Lr = 1,3 м), 214 МГц (Lr = 0,93 м), 247 МГц (Lr = 0,81 м). Параметры полученных режимов генерации приведены в таблице 9.

Таблица 9. Приведены длины резонатора, мощности накачки и параметры выходного излучения для реализации устойчивых режимов генерации УКИ.

Длина	1,93	1,54	1,3	0,93	0,81	0,67
резонатора, м						
УКИ частота	103,51	129,79	153,83	214,37	246,94	298,49
повторения,						
МГц						
Мощность	300	315	520	664	656	365
накачки, мВт						
Выходная	0,48	0,77	1,1	1,3	2,16	1,64
мощность, мВт						
Центральная	1535,4	1535,3	1535,2	1535,4	1542	1542,8
длина волны, нм						
Ширина спектра,	1	1,1	1,7	1,3	1,6	1,3
НМ						
Ширина АКФ,	6,91	6,57	5,23	6,79	2,4	3,6
пс						
S/N, дБ	50	60	55	45	75	70
ТВР	0,57	0,6	0,73	0,73	0,316	0,38
Временная			+	1	<u> </u>	1
стабильность						
Самозапуск +						

В итоге общая длина была уменьшена до 0,67 м. Таким образом, длина пассивного волокна составляла 0,55 м. При уменьшении длины резонатора были переделаны сварки волокон. Это позволило получить устойчивую СМ при мощности накачки 365 мВт. Выходная мощность в этом случае составляла 1,64 мВт. Лазер генерировал УКИ с частотой повторения 298,5 МГц (спектр ВЧ сигнала показан на рис. 61 (в)) и длительностью 1,6 пс на центральной длине волны 1543 нм. Ширина спектра составляла 1,3 нм (рис. 61 (б)). Коротковолновый пик

содержал менее одного процента выходной мощности. Стоит также отметить, что увеличение мощности накачки приводило к появлению режимов гармонической синхронизации мод с удвоенной и утроенной частотой следования импульсов, но они были недостаточно стабильны для регистрации.



Рисунок 61 – (а) – автокорреляционная функция; (б) – оптический спектр; (в), (г) – радиочастотный спектр.

Проведенное исследование успешно продемонстрировало возможность создания источников ультракоротких импульсов с высокой частотой следования импульсов с использованием активного композитного волокна, легированного комплексом ионов Er/Yb. За счет уменьшения длины пассивного волокна и увеличения мощности накачки с 300 до 664 мВт были достигнуты стабильные режимы генерации с частотой следования ультракоротких импульсов в диапазоне от 103 до 247 МГц. Длины резонаторов контролировались путем прямых измерений и дополнительно проверялись расчетами, основанными на формуле вычисления основной частоты повторения УКИ частоте следования импульсов, с использованием формулы: L = v/v, где L - длина резонатора, v - скорость света в

волокне, а υ - частота следования импульсов. При примерно одинаковой частоте следования импульсов в данной работе (214 МГц) и в работе [108] (199 МГц) наша система демонстрирует более низкое отношение сигнал/шум (S/N).

Снижение потерь (которые автоматически определялись с помощью сварочного аппарата) за счет переваривания волокон и минимизация длины резонатора привели к увеличению частоты следования импульсов до 298 МГц и повышению соотношения сигнал/шум до 70 дБ, тогда как в [108] с увеличением числа гармоники соотношение сигнал/шум уменьшалось и не превышало 60 дБ. Уменьшения выходной мощности и мощности накачки, необходимой для достижения стабильного режима СМ, может быть объяснено колебаниями потерь (в диапазоне от 0,2 до 1 дБ), возникающими в результате сваривания стандартного оптического волокна с активным. В таблице 5 показано, что лазер мог работать в двух диапазонах длин волн, а именно 1535 и 1542 нм. Наличие такой структуры в спектре генерации может быть объяснено распространением излучения по структуре соединенных волокон: маломодовое (активное) и одномодовое (пассивное). Аналогичный эффект описан в работе [123]. Наличие такого спектрального фильтра в резонаторе также ограничивает полосу пропускания и приводит к генерации относительно длинных пикосекундных импульсов.

Во всех случаях спектры сигналов хорошо аппроксимировались функцией sech², что указывало на генерацию солитонных импульсов. Тем не менее, возникновение частотной модуляции в импульсах, о чем свидетельствует произведение длительности импульсов на ширину спектра (TBP), превышающее 0,315, объясняется внутрирезонаторными потерями и дисперсионными взаимодействиями между оптическими компонентами.

После подстройки поляризации и тока накачки во всех случаях наблюдался самозапуск режима генерации УКИ. Отношение сигнал/шум превышало 45 дБ при всех исследованных длинах резонатора, достигнув 75 дБ на частоте 246,9 МГц. Эти наблюдения показывают, что достигнутые режимы СМ отличаются высокой стабильностью работы.

В отличие от многих волоконных лазеров с частотой следования импульсов более 100 МГц, данный лазер имеет полностью волоконное исполнение, что обеспечивает более высокую механическую стабильность и технологичность.

4.5. Лазер с частотой следования ультракоротких импульсов 484 МГц

Для дальнейшего уменьшения длины резонатора в представленной ранее конфигурации лазера был заменен волоконный гибридный элемент и использовалось 18 см активного композитного световода. Отличие нового WIT заключалось в уменьшенном значении коэффициента вывода из резонатора. 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. На рис. 62 изображена схема лазера с указанием физических размеров и мест сварки (красные кресты).





Рисунок 62 – Схема лазера с указанием геометрических размеров. КП – контроллер поляризации, WIT – гибридный полностью волоконный элемент, ЛД – лазерный диод.

Далее на один из торцов оптического коннектора наносились одностенные углеродные нанотрубки и пигтейлы замыкались оптической муфтой, образуя кольцевой резонатор. Схема резонатора лазера, после сборки, изображена на изображена на рис. 63.



Рисунок 63 – Схема лазера с длиной резонатора 42 см.

Композитное волокно накачивалось лазерным диодом с длиной волны 976 нм через волоконный элемент WIT, который выполнял функции мультиплексора, изолятора и оптического делителя (90/10). Из резонатора выводилось 10 % мощности. Общая длина резонатора составляла L = 0,42 м (18 см активного композитного волокна с дисперсией групповых скоростей (GVD) -9,2 пс²/км и отрезок стандартного одномодового волокна длиной 24 см с GVD -21,1 пс²/км). Синхронизация мод достигалась, как и в предыдущей работе, за счет наличия в углеродных нанотрубок (OYHT), резонаторе одного слоя одностенных помещенного между торцами двух пигтейлов. Кроме того, для точной настройки режима генерации лазерного излучения использовался один контроллер поляризации (КП). Для увеличения механической стойкости резонатора все сварные соединения были перепокрыты полимером. На рис. 64 изображена фотография резонатора лазера.



Рисунок 64 – Резонатор лазера.

Для определения характеристик лазера оптический сигнал анализировался с помощью оптического анализатора спектра (OSA, AQ6370D, YOKOGAWA), автокоррелятора (FR-103XL, Femtochrome), осциллографа (MSO64, Tektronix) и анализатора радиочастотного спектра (N9020B, Keysight).

После проверки работоспособности резонатора, для удобства использования, он был размещен в металлическом корпусе совместно с платой питания (MEAN WELL, EPS-25-5, 5B,5A,25Bт), драйвером (Maiman, SF8150) и диодом накачки (AYSX22, JK-HS02-7625-400-S1-SM). С целью увеличения стабильности работы системы накачки использовался воздушный кулер с медной трубкой, прикрепленной к драйверу. На рис. 65 изображен лазер в полной сборке.



Рисунок 65 – Лазер, помещенный в металлический корпус.

Были выбраны оптимальное положение контроллера поляризации и значение мощности накачки, необходимые для генерации одноимпульсного режима синхронизации мод. При мощности накачки 135,7 мВт был достигнут стабильный режим пассивной синхронизации мод с самозапуском.



Рисунок 66 – Автокорреляционная функция сигнала.

В одноимпульсном режиме лазер генерировал ультракороткие импульсы с частотой следования 484 МГц и длительностью 2,65 пс (рис. 66) на центральной длине волны 1543,6 нм (разрешение анализатора спектра составляло 0,02 нм). Ширина спектра составляла $\lambda_{FWHM} = 1,21$ нм (рис. 67). Относительно узкая ширина спектра и пикосекундная длительность импульса могут быть обусловлены небольшим несоответствием между апертурами композитного волокна и SMF.



Рисунок 67 – Оптический спектр УКИ.

Выходная мощность излучения составляла 0,77 мВт. Произведение длительности импульса на ширину спектра (ТВР) было равно 0,40, что показывает, что присутствует частотная модуляция импульсов. Из радиочастотных спектров в широком диапазоне 0-25 ГГц и узком 484-485 МГц (рис. 68) следует, что лазер имеет основную частоту следования импульсов 484,2 МГц с отношением сигнал/шум (S/N) более 70 дБ.



Рисунок 68 – Радиочастотный спектр сигнала.

4.6. Изменение режимов генерации в лазере с основной частотой повторения ультракоротких импульсов 484 МГц. Гармоническая синхронизация мод

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. 69.



Рисунок 69 – Зависимости временных (а) и спектральных (б) характеристик сигнала лазера, работающего в режиме синхронизации мод при увеличении мощности накачки.

Чтобы подтвердить возможность управления длительностью и шириной спектра ультракоротких импульсов в коротком кольцевом резонаторе, было проведено численное моделирование рассматриваемого лазера по стандартной методике, в которой каждому из компонентов резонатора сопоставлялась своя функция передачи; распространение света в волоконных элементах описывалось уравнениями типа Нелинейное уравнение Шредингера/Гинзбурга-Ландау. Выбор основных значений параметров моделирования производился из известных данных о волокнах (коэффициенты дисперсии, нелинейности) и других компонентах (величина модуляции и ненасыщаемые потери ОУНТ, ширина линии усиления, определяемая спектральной модуляцией композитной структуры).



Рисунок 70 – Принципиальная схема волоконного лазера, используемого при моделировании.

Принципиальная схема волоконного лазера, используемая при моделировании, близкая к экспериментальной изображена на рис. 70. Используемая численная модель аналогична описанной в [106]. В общем случае распространение света в волоконных элементах описывается двухкомпонентным нелинейным Шредингера, эффекты уравнением которое учитывает двулучепреломления, четырехволнового смешения и спектрально ограниченного усиления:

$$\frac{\partial A_X}{\partial z} - i\frac{\Delta \beta}{2}A_X + \delta\frac{\partial A_X}{\partial t} - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A_X}{\partial t^2} - i\gamma\left(|A_X|^2 + \frac{2}{3}|A_Y|^2\right)A_X - \frac{i}{3}\gamma A_X^*A_Y^2$$

$$= \frac{gA_X}{2} + \frac{g}{2\Omega_g^2}\frac{\partial^2 A_X}{\partial t^2};$$

$$\frac{\partial A_Y}{\partial z} + i\frac{\Delta \beta}{2}A_Y - \delta\frac{\partial A_Y}{\partial t} - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A_Y}{\partial t^2} - i\gamma\left(|A_Y|^2 + \frac{2}{3}|A_X|^2\right)A_Y - \frac{i}{3}\gamma A_Y^*A_X^2$$

$$= \frac{gA_Y}{2} + \frac{g}{2\Omega_g^2}\frac{\partial^2 A_Y}{\partial t^2},$$
(21)

где A_i – амплитуды поляризационных компонент, $\Delta\beta = \frac{2\pi}{L_B}$ – разница постоянных распростронения из-за двулучепреломления, L_B – длина двулучепреломления, $\delta = \frac{\Delta\beta}{2\omega_0}$ – разность групповых скоростей разных порялизаций, β_2 – дисперсия

групповых скоростей, γ – коэффициент Керовской нелинейности волокна. В пассивном одномодовом волокне коэффициент усиления *g* равен нулю, а в активном волокне насыщенный коэффициент усиления усредняется по времени моделирования и выражается как:

$$g(z) = g_0 \left(1 + \frac{1}{E_g} \int_0^{\tau_{win}} (|A_X(z,t)|^2 + |A_Y(z,t)|^2) dt \right)^{-1},$$
(22)

где g_0 - коэффициент усиления слабого сигнала, E_g - энергия насыщения усиления, определяемая мощностью накачки, τ_{win} - ширина окна моделирования. Центр спектрального фильтра усиления λ_0 =1543,6 нм и используемая в параболическом приближении ширина полосы усиления на полувысоте Ω_q .

Насыщаемый поглотитель на основе ОУНТ обладает мгновенным откликом и его действие описывается передаточной функцией:

$$A_i' = A_i \sqrt{1 - \alpha_s},\tag{23}$$

где α_s - потери в ОУНТ

$$\alpha_s = \alpha_0 \left(1 + \frac{(|A_X(z,t)|^2 + |A_Y(z,t)|^2)}{P_s} \right)^{-1} + \alpha_{ns}$$
(24)

 α_{s0} – глубина модуляции ОУНТ, P_s – мощность насыщения и α_{ns} ненасыщенные потери. Состояние поляризации света устанавливается контроллером поляризации (КП), как : $A'_x = A_x \sin \theta + A_y \cos \theta$, $A'_y = (-A_x \cos \theta + A_y \sin \theta) \exp \Delta \phi$, где θ - угол между поляризацией входного излучения и быстрой осью одномодового волокна, который настраивается контроллером поляризации, $\Delta \phi$ наводимое двулучепреломление КП. Следует отметить, что наилучшее соответствие между результатами моделирования и экспериментом достигается, когда КП компенсирует двулучепреломление в волокне $\Delta \phi = \Delta \beta (L_a + L_{SMF})$.

В таблице 6 представлены значения параметров, использованные при численном моделировании. Рассматривался случай, когда $L_1 = L_2 = 12$ см. Все линейные потери, возникающие при прохождении сигнала внутри резонатора,

учитывались, как локальные потери в выходном волоконном разветвителе с коэффициентом по мощности, равным 0,64. Окно моделирования состояло из 2¹² точек и равнялось 102,4 пс.

EDF									
β_2 (ps ² km ⁻¹)	γ (W ⁻¹ m ⁻¹)		$g_0 ({ m m}^{-1})$	Ω_g (nm)	E_g (nJ)	L_a (m)			
-9,2	0,004	4	3,75	8	0,70,9 5	0,18			
SMF			CNT						
β_2 (ps ² km ⁻¹)	$\gamma (W^{-1} m^{-1})$	L _{SMF} (m)	α_{ns}	α_{s0}		P_{s} (W)			
-21,1	0,00125	0,24	0,15	0,035		5			

Таблица 10. Значения параметров, используемых при численном моделировании.

Исследовался переход лазерной системы на стационарную генерацию одиночных УКИ, используя в качестве начальных условий низкоамплитудный гауссовский шум. Во всех рассмотренных случаях лазерная система успешно переключалась на этот режим примерно за 500-1000 циклов обхода резонатора.

Результаты моделирования для трех различных значений параметра энергии насыщения усиления Eg, соответствующих последовательно уменьшающимся уровням насыщенного усиления (т.е. накачки в эксперименте), представлены на рис.71.

Как можно видеть, результаты моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментом: снижение усиления сопровождается увеличением длительности и уменьшением ширины спектра. Близость параметров импульса, полученного в модели, к экспериментально наблюдаемым значениям свидетельствует о верном подборе ненаблюдаемых параметров (ориентации поляризации, соотношении усиления и потерь и т.п.).



Рисунок 71 – Результаты численного моделирования. (а) Огибающие импульсов, для различных указанных значений энергии насыщения усиления Eg. (b) Спектры импульсов для тех же значений энергии насыщения усиления Eg. Указаны значения ширины спектра по уровню -3 dB.

Дальнейшее увеличение мощности накачки приводило либо к переходу в режим модуляции добротности, либо к гармонической синхронизации мод с удвоенной частотой следования импульсов, в зависимости от подстройки контроллера поляризации. 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. 72, а). Подавление основной частоты повторения импульсов составляло 36 дБ (рис. 72, б). Средняя выходная мощность составляла 3 мВт. Таким образом, была подтверждена возможность получения режима гармонической синхронизации мод в данной конфигурации лазера.



Рисунок 72 – Характеристики выходного сигнала при удвоенной частоте следования импульсов. (а) оптический спектр; (б) радиочастотный спектр.

Способность к самозапуску в одноимпульсном режиме при таких хороших значениях сигнал/шум и стабильности работы подтверждает эффективность использования одностенных углеродных нанотрубок для достижения синхронизации режимов в кольцевых резонаторах полностью волоконных лазеров с относительно небольшой длиной (менее 0,5 м). В будущем планируется увеличить основную частоту следования импульсов за счет уменьшения длины композитного активного волокна (Возможна реализация при длине волокна менее 10 см).

Выводы по главе 4

На основе стандартного эрбиевого волокна был реализован кольцевой источник УКИ с частотой повторения импульсов 9 ГГц. Данная частота была получена благодаря реализации 376 гармоники режима ГСМ. В этом случае основная частота импульсов была равной 24 МГц. При уменьшении внутрирезонаторных потерь была реализована 1011-я гармоника с основной частотой 23 МГц. Несмотря на высокие значения получаемых значений частот повторений следует отметить несколько существенных недостатков:

Низкие значения шумовых характеристик выходного сигнала (S/N < 25 дБ).

2. Гистерезисный характер зависимости номера гармоники от мощности накачки.

3. Отсутствие повторяемости полученных режимов.

4. Стабильность работы генерации.

Данных недостатков лишены системы генерирующие УКИ импульсы на основной частоте. Были проведены работы по исследованию генерации в лазерах, на основе гибридных волоконных компонент, композитного волокна и ОУНТ. Для уменьшения мощности накачки, необходимой для осуществления генерации, использовалось композитное волокно, легированное комплексом активных ионов Er/Yb (в отличии от волокна, которое использовалось в линейных схемах). При постепенном сокращении длины резонатора на основе гибридного элемента с 15ти процентным выходом были получены стабильные режимы генерации с основными частотами повторениями УКИ в диапазоне от 103 до 298 МГц. Минимальное значение отношения сигнала к шуму превышало 45 дБ, а максимальное - 75 дБ. При замене гибридного элемента (уменьшении доли вывода до 10 %) был получен стабильный режим с основной частотой повторения УКИ 484 МГц и высоким отношением S/N > 70 дБ. Была продемонстрирована возможность изменения длительности импульсов и ширины их оптического спектра. Экспериментальные данные были подтверждены численным моделированием. Так же в данном лазере был получен режим гармонической синхронизации мод с удвоенной частотой (S/N = 36 дБ). Во всех реализациях лазера после первоначальной подстройки поляризации наблюдался самозапуск режима.

Заключение

В диссертационной работе проведены исследования возможности генерации ультракоротких импульсов с высокими частотами повторения. Были разработаны простые компактные схемы лазеров на основе композитных волокон и одностенных углеродных нанотрубок. Проведено определение оптических характеристик компонент, образующих резонаторы. Были представлены линейные и кольцевые резонаторы и проведена их оптимизация с целью увеличения частоты повторения УКИ, минимизации мощностей накачки, улучшения шумовых характеристик выходного излучения и стабильности режимов работы.

Основные результаты, полученные в работе, состоят в следующем:

1. Показана возможность создания источника ультракоротких импульсов с высокой частотой повторения и простой конструкцией резонатора на основе композитного волокна, легированного ионами Er с концентрацией 1,6·10²⁰ 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 1,1·10²⁰ см⁻³) и Yb (концентрация 1,5·10²⁰ 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.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в возможности создания на основе композитных волокон стабильных источников УКИ с частотами повторения более 1 ГГц. На базе подобных источников могут быть реализованы высокопроизводительные оптические аналого-цифровые преобразователи, необходимые в радиофотонике, микроэлектронике и перспективных поколениях связи.

Список цитируемой литературы

- Carlin, D.B. Diode lasers for mass market applications: optical recording and printing / D.B. Carlin, Y. Tsunoda // Proceedings of the IEEE. – 1994. – T. 82. – № 4. – C. 469-481.
- 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. T. 88. C. 359-374.
- 3. Dutta, M.J. Laser material processing / M.J. Dutta, I. Manna // International materials reviews. 2011. T. 56. № 5-6. C. 341-388.
- 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.
- Miotello, A. Advances in the application of lasers in materials science / A. Miotello, M. Dinescu, D.B. Geohegan [et al.]. Cham : Springer, 2018. T. 274.
- Endo, Y. Diode laser spectroscopy of the SF radical / Y. Endo, K. Nagai, C. Yamada [et al.] // Journal of Molecular Spectroscopy. 1983. T. 97. № 1. C. 213-219.
- Dong, L. Fiber lasers: basics, technology, and applications / L. Dong, B. Samson.
 CRC press, 2016.
- 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. T. 101. C. 90-171.
- Gursel, A.T. Fiber lasers and their medical applications / A.T. Gursel // Optical Amplifiers—A Few Different Dimensions. – 2018. – C. 13.
- Shiner, B. Fiber lasers for material processing / B. Shiner // Critical Review: Industrial Lasers and Applications. – SPIE, 2005. – T. 5706. – C. 60-68.

- 11. 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. T. 4. № 1. C. 7-15.
- 12. 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. T. 59. № 2.
 C. 211-213.
- 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. T. 27. № 13. C. 1168-1170.
- 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. – C. 213-214.
- 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. T. 28. № 15. C. 1391-1393.
- Duling, I.N. All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror / I.N.
 Duling // Optics letters. 1991. T. 16. № 8. C. 539-541.
- 17. 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. T. 22. № 5. C. 5536-5543.
- 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. – T. 49. – № 12. – C. 1108.
- 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. – T. 3. – № 3. – C. 72-76.

- 20. Femtosecond pulse generation from a topological insulator mode-locked fiber laser
 / H. Liu, X.W. Zheng, M. Liu [et al.] // Optics express. 2014. T. 22. № 6. –
 C. 6868-6873.
- 21. 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. T. 23. № 8. C. 477-479.
- 22. Passive harmonic mode-locking in an erbium-doped fibre laser / A.I. Trikshev,
 V.A. Kamynin, V.B. Tsvetkov [et al.] // Quantum Electronics. 2018. T. 48. –
 № 12. C. 1109.
- 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.
- 24. Martinez, A. Multi-gigahertz repetition rate passively modelocked fiber lasers using carbon nanotubes / A. Martinez, S. Yamashita // Optics express. 2011. T. 19. № 7. C. 6155-6163.
- 25. 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.
- Курков, А.С. Эрбиевые волоконно-оптические усилители / А.С. Курков, О.Е. Наний // Lightwave russian edition. 2003. Т. 1. С. 14-19.
- 27. Pulsed regimes of erbium-doped fiber laser Q-switched using acousto-optical modulator / Y.O. Barmenkov, A.V. Kir'yanov, J.L. Cruz [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2014. T. 20. № 5. C. 337-344.
- 28. Multi-pulse operation in an actively Q-switched Er-doped fiber laser based on electro-optic modulator / A. Zhang, C. Liu, H. Pan [et al.] // Optoelectronics letters.
 2021. T. 17. № 12. C. 729-733.

- 29. A Q-switched erbium-doped fiber laser with a graphene saturable absorber / M.A. Ismail, F. Ahmad, S.W. Harun [et al.] // Laser physics letters. 2013. T. 10. № 2. C. 025102.
- 30. Modeling and characteristics of gain-switched diode-pumped Er-Yb codoped fiber lasers / J. Yang, Y. Tang, R. Zhang [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. - 2012. - T. 48. - № 12. - C. 1560-1567.
- 31. Self-balanced Q-and gain-switched erbium all-fiber laser / T.Y. Tsai, H.H. Ma,
 Y.C. Fang [et al.] // AIP Advances. 2011. T. 1. № 3.
- 32. Agrež, V. Gain-switched Yb-doped fiber laser for microprocessing / V. Agrež, R.
 Petkovšek // Applied Optics. 2013. T. 52. № 13. C. 3066-3072.
- 33. Wide wavelength-tunable passive mode-locked Erbium-doped fiber laser with a SESAM / I. Armas-Rivera, L.A. Rodriguez-Morales, M. Durán-Sánchez [et al.] // Optics & Laser Technology. 2021. T. 134. C. 106593.
- Kafka, J.D. Mode-locked erbium-doped fiber laser with soliton pulse shaping / J.D.
 Kafka, T. Baer, D.W. Hall // Optics letters. 1989. T. 14. № 22. C. 1269-1271.
- 35. 70-fs mode-locked erbium-doped fiber laser with topological insulator / W. Liu, L.
 Pang, H. Han [et al.] // Scientific reports. 2016. T. 6. № 1. C. 19997.
- 36. Time-bandwidth product of chirped sech² pulses: application to phase-amplitude-coupling factor measurement / P. Lazaridis, G. Debarge, P. Gallion // Optics letters.
 1995. T. 20. № 10. C. 1160-1162.
- 37. Chen, C. Coherence time-bandwidth product for chirped Gaussian pulses / C. Chen,
 H. Chen // Optik. 2013. T. 124. № 21. C. 5199-5201.
- 38. Pulse shortening mode-locked fiber laser by thickness and concentration product of carbon nanotube based saturable absorber / J.C. Chiu, C.M. Chang, B.Z. Hsieh [et al.] // Optics express. 2011. T. 19. № 5. C. 4036-4041.

- 39. Kim, J. All-fiber acousto-optic modulator based on a cladding-etched optical fiber for active mode-locking / J. Kim, J. Koo, J.H. Lee // Photonics Research. 2017. T. 5. № 5. C. 391-395.
- 40. Actively mode-locked fiber ring laser by intermodal acousto-optic modulation / M. Bello-Jiménez, C. Cuadrado-Laborde, D. Sáez-Rodríguez [et al.] // Optics letters.
 2010. T. 35. № 22. C. 3781-3783.
- Cuadrado-Laborde, C. Experimental study of an all-fiber laser actively modelocked by standing-wave acousto-optic modulation / C. Cuadrado-Laborde, A. Díez, J.L. Cruz, M.V. Andrés // Applied physics B. - 2010. - T. 99. - C. 95-99.
- 42. Mode locking of an all-fiber laser by acousto-optic superlattice modulation / C. Cuadrado-Laborde, A. Diez, M. Delgado-Pinar [et al.] // Optics Letters. 2009. T. 34. № 7. C. 1111-1113.
- Demonstration of high-stable self-mode-locking pulses based on self-focusing in fiber lasers / S. Sun, X. Shang, F. Yang [et al.] // Infrared Physics & Technology. -2022. - T. 125. - C. 104244.
- 44. Звелто, О. Принципы лазеров / О. Звелто. Мир, 1990.
- 45. Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика / Г. Агравал. Academic Pr, 1989.
- 46. Study of an Er-doped all-PM-fiber laser mode-locked by nonlinear polarization evolution / Z. Peng, Z. Cheng, X. Bu [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters.
 2018. T. 30. № 24. C. 2111-2114.
- 47. Generation of stretched pulses from an all-polarization-maintaining Er-doped mode-locked fiber laser using nonlinear polarization evolution / L. Zhou, Y. Liu, G. Xie [et al.] // Applied Physics Express. 2019. T. 12. № 5. C. 052017.
- 48. 115-MHz Linear NPE fiber laser using all polarization-maintaining fibers / X. Liu,
 R. Zhou, D. Pan [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. 2020. T. 33. №
 2. C. 81-84.

- 49. Yoshida, E. Femtosecond erbium-doped fiber laser with nonlinear polarization rotation and its soliton compression / E. Yoshida, Y.K. Kimura, M.N. Nakazawa // Japanese journal of applied physics. 1994. T. 33. № 10R. C. 5779.
- 50. Iijima, S. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter / S. Iijima, T. Ichihashi // nature. 1993. T. 363. № 6430. C. 603-605.
- 51. Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls / D.S. Bethune, C.H. Kiang, M.S. De Vries [et al.] // Nature. 1993. T. 363. № 6430.
 C. 605-607.
- 52. Electric field effect in atomically thin carbon films / K.S. Novoselov, A.K. Geim,
 S.V. Morozov [et al.] // Science. 2004. T. 306. № 5696. C. 666-669.
- 53. Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization / T. Guo, P. Nikolaev, A. Thess [et al.] // Chemical physics letters. 1995. T. 243. № 1-2. C. 49-54.
- 54. Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes / A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev [et al.] // Science. 1996. T. 273. № 5274. C. 483-487.
- 55. Single-wall carbon nanotube formation by laser ablation using double-targets of carbon and metal / M. Yudasaka, T. Komatsu, T. Ichihashi [et al.] // Chemical physics letters. 1997. T. 278. № 1-3. C. 102-106.
- 56. Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by the electric-arc technique / C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier [et al.] // Nature. 1997. T. 388. № 6644. C. 756-758.
- 57. The study of carbon nanotubules produced by catalytic method / V. Ivanov, J.B. Nagy, P. Lambin [et al.] // Chemical Physics Letters. 1994. T. 223. № 4. C. 329-335.
- Solid-phase production of carbon nanotubes / W.K. Hsu, Y.Q. Zhu, S. Trasobares [et al.] // Applied Physics A. - 1999. - T. 68. - C. 493-495.

- 59. Catalytic growth of single-wall carbon nanotubes from metal particles / J.H. Hafner, M.J. Bronikowski, B.R. Azamian [et al.] // Chemical Physics Letters. 1998. T. 296. № 1-2. C. 195-202.
- Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide / P. Nikolaev, M.J. Bronikowski, R.K. Bradley [et al.] // Chemical physics letters. - 1999. - T. 313. - № 1-2. - C. 91-97.
- Gas-phase production of carbon single-walled nanotubes from carbon monoxide via the HiPco process: A parametric study / M.J. Bronikowski, P.A. Willis, D.T. Colbert [et al.] // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2001. T. 19. № 4. C. 1800-1805.
- 62. A novel aerosol method for single walled carbon nanotube synthesis / A.G. Nasibulin, A. Moisala, D.P. Brown [et al.] // Chemical Physics Letters. 2005. T. 402. № 1-3. C. 227-232.
- 63. Mode-locked fiber laser using an SU8/SWCNT saturable absorber / I. Hernandez-Romano, D. Mandridis, D.A. May-Arrioja [et al.] // Optics letters. 2011. T. 36.
 № 11. C. 2122-2124.
- 64. Nanosecond soliton pulse generation by mode-locked erbium-doped fiber laser using single-walled carbon-nanotube-based saturable absorber / M.A. Ismail, S.W. Harun, N.R. Zulkepely [et al.] // Applied optics. 2012. T. 51. № 36. C. 8621-8624.
- 65. Huang, L. Dynamics of carbon nanotube-based mode-locking fiber lasers / L. Huang, Y. Zhang, X. Liu // Nanophotonics. 2020. T. 9. № 9. C. 2731-2761.
- 66. A passively mode-locked erbium-doped fiber laser based on a single-wall carbon nanotube polymer / F. Ahmad, S.W. Harun, R.M. Nor [et al.] // Chinese Physics Letters. 2013. T. 30. № 5. C. 054210.

- 67. All-polarization-maintaining Er-doped ultrashort-pulse fiber laser using carbon nanotube saturable absorber / N. Nishizawa, Y. Seno, K. Sumimura [et al.] // Optics express. - 2008. - T. 16. - № 13. - C. 9429-9435.
- 68. Tunable ytterbium-doped mode-locked fiber laser based on single-walled carbon nanotubes / H. Guo, L. Hou, Y. Wang [et al.] // Journal of Lightwave Technology.
 2019. T. 37. № 10. C. 2370-2374.
- 69. Self-starting mode-locked Cr: ZnS laser using single-walled carbon nanotubes with resonant absorption at 2.4 µm / D. Okazaki, H. Arai, A. Anisimov [et al.] // Optics letters. - 2019. - T. 44. - № 7. - C. 1750-1753.
- 70. Performance peculiarities of carbon-nanotube-based thin-film saturable absorbers for erbium fiber laser mode-locking / A.A. Krylov, S.G. Sazonkin, N.R. Arutyunyan [et al.] // Journal of the Optical Society of America B. 2016. T. 33. № 2. C. 134-142.
- 71. Komarov, A. Passive harmonic mode-locking in a fiber laser with nonlinear polarization rotation / A. Komarov, H. Leblond, F. Sanchez // Optics communications. 2006. T. 267. № 1. C. 162-169.
- 72. Stable passively harmonic mode-locking dissipative pulses in 2µm solid-state laser
 / W. Zhou, X. Fan, H. Xue [et al.] // Optics Express. 2017. T. 25. № 3. C. 1815.
- 73. Komarov, A. Multistability and hysteresis phenomena in passively modelocked fiber lasers / A. Komarov, H. Leblond, F. Sanchez // Physical Review A. 2005. T. 71. № 5. C. 053809.
- 74. Jaouën, Y. Transverse Brillouin Effect Produced by Electrostriction in Optical Fibers and Its Impact on Soliton Transmission Systems / Y. Jaouën, L. Du Mouza // Optical Fiber Technology. 2001. T. 7. № 3. C. 141-169.
- 75. Passively harmonic mode-locked erbium-doped fiber soliton laser with a nonlinear polarization rotation / X.M. Liu, T. Wang, C. Shu [et al.] // Laser physics. 2008.
 T. 18. C. 1357-1361.

- 76. Passive harmonically mode-locked erbium-doped fiber laser with scalable repetition rate up to 1.2 GHz / Z.X. Zhang, L. Zhan, X.X. Yang [et al.] // Laser Physics Letters. 2007. T. 4. № 8. C. 592.
- T. L-band GHz femtosecond passively harmonic mode-locked Er-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation / Y. Ling, Q. Huang, C. Zou [et al.] // IEEE Photonics Journal. 2019. T. 11. № 4. C. 1-7.
- Passively harmonic mode locked erbium doped fiber soliton laser with carbon nanotubes based saturable absorber / C. Mou, R. Arif, A. Rozhin [et al.] // Optical Materials Express. 2012. T. 2. № 6. C. 884-890.
- 79. A passively harmonically mode-locked soliton erbium-doped fiber laser with low pumping threshold using a single-walled carbon nanotubes / R.Z.R. Rosdin, N.M. Ali, H. Arof [et al.] // Microwave and Optical Technology Letters. 2015. T. 57. № 4. C. 799-803.
- Passively harmonic mode-locked Er-doped fiber laser At 1.15 GHz by carbon nanotubes film saturable Absorber / Q. Huang, C. Zou, T. Wang [et al.] // 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). - 2018. - C. 1-3.
- 81. Rational harmonic mode-locking of erbium-doped fiber laser at 40 GHz using a loss-modulated Fabry-Pe/spl acute/rot laser diode / G.R. Lin, Y.C. Chang, J.R. Wu
 // IEEE Photonics Technology Letters. 2004. T. 16. № 8. C. 1810-1812.
- Min, S. Repetition rate multiplication in figure-eight fibre laser with 3 dB couplers
 / S. Min, Y. Zhao, S. Fleming // Optics communications. 2007. T. 277. № 2. C. 411-413.
- 83. Optical-fiber pulse rate multiplier for ultralow phase-noise signal generation / A. Haboucha, W. Zhang, T. Li [et al.] // Optics letters. 2011. T. 36. № 18. C. 3654-3656.
- 84. Lossless fractional repetition-rate multiplication of optical pulse trains / R. Maram,
 J. Van Howe, M. Li [et al.] // Optics Letters. 2015. T. 40. № 3. C. 375-378.
- 3.5-GHz intra-burst repetition rate ultrafast Yb-doped fiber laser / C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi [et al.] // Optics Communications. 2016. T. 366. C. 404-409.
- 86. Андрианов, А.В. Волоконный лазер с субтерагерцевой частотой следования ультракоротких импульсов в телекоммуникационном диапазоне / А.В. Андрианов, В.М. Мыльников, М.Ю. Коптев [et al.] // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 4. С. 387-391.
- 87. Passively mode-locked Raman fiber laser with 100 GHz repetition rate / J. Schröder, S. Coen, F. Vanholsbeeck [et al.] // Optics letters. 2006. T. 31. № 23. C. 3489-3491.
- 88. 250-GHz passive harmonic mode-locked Er-doped fiber laser by dissipative fourwave mixing with silicon-based micro-ring / S.S. Jyu, L.G. Yang, C.Y. Wong [et al.] // IEEE Photonics Journal. - 2013. - T. 5. - № 5. - C. 1502107.
- 89. Full C-band wavelength-tunable, 250 MHz repetition rate mode-locked polarization-maintaining fiber laser / Y.S. Jang, J. Park, J. Jin // Scientific Reports.
 2023. T. 13. № 1. C. 3623.
- 90. All-fiber fundamentally mode-locked 12 GHz laser oscillator based on an Er/Yb-doped phosphate glass fiber / R. Thapa, D. Nguyen, J. Zong [et al.] // Optics Letters.
 2014. T. 39. № 6. C. 1418-1421.
- 91. Lerminaux, C. Integration of optical devices on planar substrates / C. Lerminaux,
 R.O. Maschmeyer // Integrated Optics Devices: Potential for Commercialization. SPIE, 1997. T. 2997. C. 154-163.
- 92. Иванов, Г.А. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон / Г.А. Иванов, В.П. Первадчук. - 2011.
- 93. Performance of high-concentration erbium-doped fiber amplifiers / P. Myslinski,
 C. Szubert, A.J. Bruce [et al.] // IEEE Photonics technology letters. 1999. T. 11.
 № 8. C. 973-975.
- 94. Efficient, high power, high gain, Er3+ doped silica fibre amplifier / J.F. Massicott,
 R. Wyatt, B.J. Ainslie [et al.] // Electronics Letters. 1990. T. 26. № 14. C. 1038-1039.
- 95. Усилительные свойства активных световодов с высокой концентрацией ионов эрбия / А.Ю. Плоцкий, В.М. Мыльников, С.В. Муравьев [et al.] // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 6. С. 559-562.

- 96. Fabrication of aluminum doped silica preform using MCVD and solution doping technique: soot analyses and solution concentration effect / S.M. Aljamimi, Z. Yusoff, H.A. Abdul-Rashid [et al.] // Advanced Materials Research. 2014. T. 896. C. 197-202.
- 97. Dorosz, D. Rare earth ions doped aluminosilicate and phosphate double clad optical fibres / D. Dorosz // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. - 2008. - C. 103-111.
- 98. An efficient erbium doped phosphate laser glass for high average power pumping
 / L. Chen, D. He, F. Luan [et al.] // Journal of alloys and compounds. 2009. T.
 482. № 1-2. C. 261-263.
- 99. Un-chirped short laser pulses amplification and compression in a compact edfa based on a 3 wt.% er-doped composite fiber / B.I. Galagan, B.I. Denker, I.V. Zhluktova [et al.] // Science and society-Methods and problems of practical application. 2020. C. 22-28.
- 100. Single-frequency continuous-wave laser based on the novel Er/Yb-doped composite phosphosilicate fiber / A.A. Rybaltovsky, S.E. Sverchkov, V.V. Vel'miskin [et al.] // Optics & Laser Technology. 2022. T. 151. C. 108049.
- 101. Erbium–ytterbium codoped phosphate core/double silica clad composite optical fibres for compact amplifiers / B.I. Galagan, B.I. Denker, O.G. Egorova [et al.] // Quantum Electronics. 2018. T. 48. № 6. C. 550.
- 102. Dennis, M.L. Experimental study of sideband generation in femtosecond fiber lasers / M.L. Dennis, I.N. Duling // IEEE Journal of Quantum electronics. 1994.
 T. 30. № 6. C. 1469-1477.
- 103. Lin, Y.H. Kelly sideband variation and self four-wave-mixing in femtosecond fiber soliton laser mode-locked by multiple exfoliated graphite nano-particles / Y.H. Lin, G.R. Lin // Laser Physics Letters. - 2013. - T. 10. - № 4. - C. 045109.
- 104. Pulsating soliton with broadened Kelly sidebands in an ultrafast fiber laser / Y. Du,
 M. Han, P. Cheng [et al.] // Optics letters. 2019. T. 44. № 16. C. 4087-4090.

- 105. Revision on fiber dispersion measurement based on Kelly sideband measurement / Y. Ge, Q. Guo, J. Shi [et al.] // Microwave and Optical Technology Letters. 2016.
 T. 58. № 1. C. 242-245.
- 106. Experimental and numerical study of different mode-locking techniques in holmium fiber laser with a ring cavity / S. Filatova, V. Kamynin, D. Korobko [et al.] // Optics Express. - 2024. - T. 32. - № 13. - C. 22233-22248.
- 107. Performance peculiarities of carbon-nanotube-based thin-film saturable absorbers for erbium fiber laser mode-locking / A.A. Krylov, S.G. Sazonkin, N.R. Arutyunyan [et al.] // Journal of the Optical Society of America B. 2016. T. 33. № 2. C. 134-142.
- 108. Double harmonic mode-locking in soliton fiber ring laser acquired through the resonant optoacoustic coupling / V.A. Ribenek, P.A. Itrin, D.A. Korobko [et al.] // APL Photonics. - 2024. - T. 9. - № 5.
- 109. 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. - T. 49. - № Suppl 1. - C. S35-S42.
- 110. Advanced distributed feedback lasers based on composite fiber heavily doped with erbium ions / M.I. Skvortsov, A.A. Wolf, A.A. Vlasov [et al.] // Scientific Reports.
 2020. T. 10. № 1. C. 14487.
- 111. Single-walled carbon nanotube synthesis using ferrocene and iron pentacarbonyl in a laminar flow reactor / A. Moisala, A.G. Nasibulin, D.P. Brown [et al.] // Chemical Engineering Science. 2006. T. 61. № 13. C. 4393-4402.
- 112. Controlled synthesis of single-walled carbon nanotubes in an aerosol reactor / Y. Tian, A.G. Nasibulin, B. Aitchison [et al.] // The Journal of Physical Chemistry C. 2011. T. 115. № 15. C. 7309-7318.

- 113. Aerosol-synthesized SWCNT networks with tunable conductivity and transparency by a dry transfer technique / A. Kaskela, A.G. Nasibulin, M.Y. Timmermans [et al.] // Nano letters. - 2010. - T. 10. - № 11. - C. 4349-4355.
- 114. Ultrafast all-fibre laser mode-locked by polymer-free carbon nanotube film / S. Kobtsev, A. Ivanenko, Y.G. Gladush [et al.] // Optics express. 2016. T. 24. № 25. C. 28768-28773.
- 115. 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. T. 249. C. 168218.
- 116. Gumenyuk, R.V. Stabilization of passive harmonic mode locking in a fiber ring laser / R.V. Gumenyuk, D.A. Korobko, I.O. Zolotovskii // Optics Letters. 2019. T. 45. № 1. C. 184-187.
- 117. Passive harmonic mode locking of soliton bunches in a fiber ring laser / L.M. Zhao,
 D.Y. Tang, T.H. Cheng [et al.] // Optical and Quantum Electronics. 2008. T. 40.
 C. 1053-1064.
- 118. Kang, M.S. Passive mode-locking of fiber ring laser at the 337th harmonic using gigahertz acoustic core resonances / M.S. Kang, N.Y. Joly, P.S. Russell // Optics Letters. - 2013. - T. 38. - № 4. - C. 561-563.
- 119. Harmonic mode-locking fiber ring laser with a pulse repetition rate up to 12 GHz / D.A. Korobko, D.A. Stoliarov, P.A. Itrin [et al.] // Optics & Laser Technology. 2021. T. 133. C. 106526.
- 120. 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.
- 121. Control of supercontinuum generation due to soliton propagation in fibers with varying dispersion / D. Korobko, V. Kamynin, M. Salganski [et al.] // Optik. 2023.
 T. 287. C. 171032.

- 122. 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. T.
 88. C. 104007.
- 123. Switchable L-band dual-wavelength dark-bright pulse pair generation from an Er-doped mode-locked fiber laser with SMF-GIMF-SMF as the saturable absorber / M. Liu, Y. Qi, S. Yang [et al.] // Applied physics B. 2022. T. 128. № 10. C. 190.

Список публикаций автора по теме диссертации

- 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. - T. 249. - C. 168218.
- 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. -T. 88. - C. 104007.
- 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. T. 49. № Suppl 1. C. S35-S42.
- 5. (Invited) 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. T. 287. C. 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 //Фотонэкспресс. – 2021. – №. 6 (174). – С. 106-107.

Список докладов на конференциях по теме диссертации

- А.Д. Зверев, В.А. Камынин, С.А. Филатова, Ю.Г. Гладуш, А.Г. Насибулин, Б.И. Денкер, Б.И. Галаган, С.Е. Сверчков, В.Б. Цветков, С.Л. Семёнов Эрбиевый волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод и частотой повторения импульсов 150 МГц, 9Й Международный семинар по волоконным лазерам, 2020, Новосибирск.
- Зверев А. Д., Камынин В. А., Цветков В. Б., Денкер Б. И., Сверчков С. Е., Вельмискин В. В. Однопроходное и двухпроходное усиление УКИ в сильнолегированном комплексом Er/Yb активном волокне, 10 Международный семинар по волоконным лазерам, 2022, Новосибирск.
- А.Д. Зверев, В.А. Камынин, С. А. Филатова, Ю.Г. Гладуш, Д.В. Красников, А.Г. Насибулин, Б.И. Денкер, С.Е. Сверчков, В.В. Вельмискин, В.Б. Цветков, Источники ультракоротких импульсов с субгигагерцовой частотой повторения, 11 Международный семинар по волоконным лазерам, 2024, Новосибирск.
- 4) Зверев А. Д., Камынин В. А., Исследование однопроходного и двухпроходного усиления ультракоротких импульсов в композитном Er/Yb активном волокне, Тезисы докладов Школы-конференции молодых ученых «Прохоровские недели», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. АМ Прохорова Российской академии наук», 2022, Москва.
- 5) Зверев А. Д., Красновская К. А., Камынин В. А., Исследование параметра дисперсии групповой скорости в композитном Er/Yb активном волокне, Тезисы докладов Школы-конференции молодых ученых «Прохоровские недели», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. АМ Прохорова Российской академии наук», 2024. Москва.

- 6) Зверев А.Д., Камынин В.А., Цветков В.Б., Жлуктова И.В., Сысолятин А.А., Генератор широкополосного оптического излучения с частотой следования импульсов более 300 МГц, Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024», 2024, Москва.
- 7) Зверев А.Д., Камынин В.А., Цветков В.Б., Сверчков С.Е., Вельмискин В.В., Денкер Б.И., Гладуш Ю.Г., Насибулин А.Г., Эрбиевый волоконный лазер с частотой повторения ультракоротких импульсов 300 МГц, Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023», 2023, Москва.
- 8) Зверев А.Д., Камынин В.А., Филатова С. А., Воронин В.Г., Цветков В.Б., Галаган Б.И., Сверчков С.Е., Денкер Б.И., Гладуш Ю.Г., Хабушев Э.М., Красников Д.В., Насибулин А.Г., Оптимизация линейной схемы резонатора эрбиевого волоконного лазера с целью увеличения частоты повторения импульсов с 47 до 150 МГц, Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021», 2021, Москва.
- 9) Zverev A.D., Kamynin V.A., Tsvetkov V.B., Sverchkov S.E., Velmiskin V.V., Denker B.I., Gladush Yu.G., Nasibulin A.G., Erbium fiber source of ultrashort pulses with fundamental repetition rate of 300 MHz, 31st annual International Laser PhysicsWorkshop, онлайн, 2023.
- A.D.Zverev, V.A.Kamynin, B.I.Denker, B.I. Galagan, S.E. Sverchkov, V.V.
 Vel'miskin, I.S. Panyaev, P.A. Itrin, D.A.Korobko, I.O. Zolotovskii,
 V.B.Tsvetkov, Amplification of ultrashort pulses in a composite fiber with an Er / Yb core, Санкт-Питербург, 2022.
- A. Zverev, V. Kamynin, V. Tsvetkov, S. Sverchkov, V. Velmiskin, B. Denker, Y. Gladush, A. Nasibulin, Optimization of the length of the cavity of an erbium fiber laser with a sub-GHz repetition rate of ultrashort pulses, Сборник трудов конференции «International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT)». – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Самара, 2023.

12) A. Zverev, V. Kamynin, V. Tsvetkov, B. Denker, S. Sverchkov, V. Velmiskin, Y. Gladush, D. Krasnikov, A. Nasibulin, Er-Yb all-fiber lasers with sub-GHz pulses repetition rates based on composite active fibers, Сборник трудов конференции «International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT)». – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Новосибирск, 2024.