

На правах рукописи



Поносова Анастасия Александровна

**ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ЭРБИЕВЫХ
КОМПОЗИТНЫХ СВЕТОВОДОВ**

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

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

Научный руководитель: **Цветков Владимир Борисович**
доктор физико-математических наук, заместитель директора ИОФ РАН по научной работе

Официальные оппоненты: **Кундикова Наталия Дмитриевна**
доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией нелинейной оптики

Лазарев Владимир Алексеевич
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)», начальник лаборатории стабилизированных лазерных систем НОЦ «Фотоника и ИК-техника»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «20» декабря 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.02 при ИОФ РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. №1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН <http://diss.gpi.ru>.

Автореферат диссертации разослан « » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук
тел. +7 (499) 503-87-77 доб. 4-13



А.А. Ушаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Волоконные источники излучения в спектральной области 1525-1565 нм на основе эрбиевых световодов являются одним из наиболее значимых практических достижений науки, возникшим на стыке волоконной оптики и лазерной физики. К настоящему моменту такие источники незаменимы во многих областях науки и техники, в частности, для передачи информации по волоконным линиям связи, для интерферометрических датчиков физических величин, научного приборостроения и др.

Традиционно активной средой для данных источников служат световоды из кварцевых стекол, легированных ионами редкоземельных элементов (РЗЭ), как правило – ионами эрбия. Однако с точки зрения легирования ионами РЗЭ, в частности эрбия, кварцевые стекла не являются оптимальными. В подобных матрицах даже при относительно невысоких концентрациях эрбия наблюдается миграция возбуждения между ионами, снижающая эффективность усиления. Поэтому концентрация ионов эрбия в кварцевых световодах не превышает 0.4 вес. %.

Многочисленные работы последних 20 лет посвящены созданию и исследованию световодов на основе многокомпонентных стекол, позволяющих вводить на порядок большие концентрации активных ионов в сравнении с кварцевыми без концентрационного тушения люминесценции. Это обусловлено потенциальной возможностью улучшения параметров волоконных источников излучения за счет уменьшения длины активного волокна. В случае усилителей импульсного излучения предполагается снижение нежелательных нелинейных эффектов (фазовой самомодуляции, вынужденного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна). Использование высококонцентрированных активных волоконных сред должно облегчить создание одночастотных лазеров с высокой средней мощностью и импульсных лазеров с высокой частотой повторения импульсов.

Таким образом, актуальным является исследование активных волоконных сред с высокими концентрациями ионов РЗЭ для источников излучения в диапазоне 1525-1565 нм.

Коллективом авторов Института общей физики РАН совместно с Научным центром волоконной оптики РАН были разработаны высококонцентрированные композитные волокна с фосфатной сердцевиной в кварцевой оболочке. Подобная конструкция оптического волокна позволяет вводить высокие концентрации редкоземельных элементов в фосфатную сердцевину на порядок большие в сравнении с кварцевыми, без концентрационного тушения люминесценции и, одновременно, обеспечивает высокую механическую стойкость и легкость сварки с традиционными кварцевыми волокнами благодаря кварцевой оболочке.

Цель диссертационной работы

Цель работы состояла в создании компактных полностью волоконных источников излучения 1.5 мкм диапазона на основании результатов, полученных при исследовании спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик высококонцентрированных эрбиевых композитных световодов.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. исследование оптических характеристик композитных световодов с высококонцентрированной Er^{3+} и $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ фосфатной сердцевиной в кварцевой оболочке и их связи с элементным составом сердцевины;
2. определение оптимальных режимов сварки исследуемых образцов с кварцевыми световодами, обеспечивающих минимальные потери;
3. создание и исследование полностью волоконных источников усиленного спонтанного излучения (УСИ);
4. создание и исследование полностью волоконных усилителей;
5. создание и исследование полностью волоконных непрерывных и импульсных лазеров различной конфигурации.

Научная новизна

1. Впервые созданы и исследованы полностью волоконные суперлюминесцентные источники излучения на основе композитных световодов с

высококонтрированной фосфатной сердцевиной в кварцевой оболочке. Получены выходные параметры источников на уровне, соответствующем требованиям для применения в волоконно-оптических гироскопах, но с длиной активной среды на порядок меньшей, чем для стандартных волокон.

2. Впервые изучен элементный состав сердцевины изготовленного композитного волокна и его влияние на оптические характеристики лазеров. В результате исследований установлено, что высокая эффективность усиления и лазерной генерации композитных световодов сохраняется даже при высоком содержании оксида кремния (от 50 до 75 мол.%) в легированной эрбием сердцевине.

3. Исследовано усиление непрерывного сигнала мощностью от -30 дБм до 7 дБм в композитных световодах, легированных эрбием. В полностью волоконных усилителях получены высокие коэффициенты усиления непрерывного слабого сигнала (мощностью -30 дБм) на единицу длины (до 3.1 дБ/см), что сопоставимо с удельными коэффициентами усиления полностью фосфатных световодов (от 3 до 5.2 дБ/см) и на порядок выше усиления кварцевых световодов.

4. Исследовано усиление импульсного сигнала в композитных световодах. В световоде, легированном 1 вес.% ионов эрбия, определена пороговая интенсивность возникновения нелинейных эффектов, которая составила около 6.5×10^8 Вт/см². Показано, что при усилении импульсного сигнала в композитном световоде, содержащем 3 вес.% ионов эрбия, длиной 20 см происходит сжатие импульса длительностью 1,59 пс до 270 фс. Сокращение длительности импульса зависит от инверсии населенности активной среды усилителя.

5. Впервые исследована непрерывная лазерная генерация композитных световодов. Показано, что использование композитного световода, легированного 3 вес.% ионов эрбия, длиной 15 см позволяет достичь дифференциальной эффективности непрерывного лазера 39 % и выходной мощности до 105 мВт.

6. Впервые реализован полностью волоконный фемтосекундный лазер с синхронизацией мод за счет нелинейного вращения плоскости поляризации, в качестве активной среды которого использован композитный световод длиной 7 см.

Научно-практическая значимость работы.

Практическая ценность работы заключается в демонстрации возможности уменьшения габаритов разнообразных полностью волоконных источников излучения 1.5 мкм диапазона за счет использования высококонцентрированных композитных световодов, легированных эрбием, и возможности оптимизации параметров световода под конкретные задачи.

Научная ценность работы заключается в подробном исследовании новых композитных световодов с сердцевиной из высококонцентрированного фосфатного стекла и установлению факта получения высокой эффективности усиления в 1.5-мкм диапазоне спектра в световодах, содержащих до 3 вес.% ионов эрбия, при увеличении концентрации оксида кремния в сердцевине до 75 мол.%.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Использование высококонцентрированных композитных световодов, легированных 3 вес.% ионов эрбия, обеспечивает выходную мощность суперлюминесцентных волоконных источников излучения близкую к значениям СВИ на основе кварцевых эрбиевых световодов (около 30 мВт), при длине активного световода 45 см, на порядок меньшей в сравнении со стандартными эрбиевыми волокнами.

2. Использование высококонцентрированного композитного волокна, содержащего 3 вес.% ионов эрбия, длиной 20 см или волокна, содержащего 1 вес.% ионов эрбия, длиной 50 см обеспечивает коэффициент усиления в 38 дБ для сигнала мощностью 1 мкВт. Подавление усиленного спонтанного излучения составляет более 20 дБ.

3. Использование одномодового композитного световода, легированного 3 вес.% эрбия, и накачки в сердцевину лазерным диодом с длиной волны генерации 976 нм обеспечивает высокую эффективность непрерывной лазерной генерации до 39 % на длине волны 1535 нм.

4. Использование высококонцентрированного световода, содержащего 3 вес.% эрбия, длиной 7 см позволяет создать стабильный фемтосекундный волоконный

лазер с синхронизацией мод за счет нелинейной эволюции плоскости поляризации с длительностью импульсов порядка 480 фс и отношением сигнал-шум более 50 дБ.

Личный вклад автора заключается в проведении экспериментальных измерений и численных расчетов, в написании научных статей и их подготовке к публикации. Все использованные в работе экспериментальные результаты, описанные в главах 3-5, получены автором лично или при определяющем его участии. Материалы, представленные в работе, получены в результате экспериментальных исследований, выполненных автором в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Публикации. Основные результаты опубликованы в 8 статьях рецензируемых научных журналов, 4 из которых удовлетворяют требованиям ВАК и входят в базу Web of Science. Список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата.

Апробация работы.

Результаты работы представлены в 17 докладах на 16 конференциях: Всероссийской конференции по волоконной оптике 2015, 2017 и 2019 (Пермь, 2015 г., 2017 г. и 2019 г.), 14-ой, 15-ой, 16-ой и 17-ой Международной научной школе-конференции «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 2015-2018 г.), 7-ом Российском семинаре по волоконным лазерам (Новосибирск, 2016 г.), Advanced Laser Technologies ALT'16 (Galway, Ireland, 2016 г.) и ALT'18 (Tarragona, Spain, 2018 г.), Прохоровских неделях (Москва, 2018 г.), XVI Всероссийском молодежном Самарском конкурсе-конференции научных работ по оптике и лазерной физике (Самара, 2018 г.), International Conference Laser Optics (ICLO, Санкт-Петербург, 2018 г.), Ломоносов-2019 (Москва, 2019 г.), CLEO-Europe (Munich, 2019 г.), 28th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'19, Gyeongju, South Korea, 2019).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, списка публикаций по теме диссертации, списка цитированной литературы и списка

сокращений. Работа содержит 162 страницы, 84 рисунка, 5 таблиц и список литературы, включающий 200 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, представлен краткий обзор, характеризующий степень разработанности темы на момент начала исследований, сформулированы цель, задачи исследований и основные защищаемые положения, показаны научная новизна работы и ее научно-практическая ценность, описан вклад автора в решение поставленных задач.

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. Рассмотрены фундаментальные основы формирования спектрально-люминесцентных свойств ионов эрбия и системы эрбий-иттербий в стёклах. Также рассмотрены и сравнены параметры различных волоконных источников излучения (СВИ, волоконных усилителей и непрерывных и импульсных волоконных лазеров) на основе традиционных кварцевых световодов и высококонцентрированных световодов, легированных ионами эрбия. Особое внимание уделено анализу параметров источников излучения на основе высококонцентрированных фосфатных световодов.

Вторая глава посвящена исследованию параметров композитных световодов с высококонцентрированной фосфатной сердцевиной, легированной эрбием и системой эрбий-иттербий, в кварцевой оболочке. Кратко описана технология изготовления композитных световодов. Исследование эрбиевых световодов выполнено автором лично, а эрбий-иттербиевые световоды были охарактеризованы О.Н. Егоровой.

Образцы композитных световодов отличались содержанием РЗЭ в фосфатной сердцевине: ЭС#1 и ЭС#2 были легированы 1 и 3 вес.% ионов эрбия, соответственно; а световоды ЭС#3 и ЭС#4 легированы системой эрбий-иттербий (1.3 вес.% ионов эрбия и 17.3 вес.% ионов иттербия).

Элементный состав стекла в поперечном сечении световодов после вытяжки был изучен с помощью сканирующего электронного микроскопа, оборудованного энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (EDX). Установлено, что в

процессе вытяжки световодов состав стекла сердцевины существенно изменился из-за взаимной диффузии компонентов стёкол сердцевины и оболочки (рис. 1).

Согласно измерениям, концентрация P_2O_5 в сердцевинах световодов ЭС#1 и ЭС#2 снизилась с 65 мол.% до 20 мол.%, а SiO_2 увеличилась до 75 мол.%. В то же время, концентрация ионов эрбия в центре сердцевины световодов уменьшалась незначительно, с 3 вес.% до 2.5 вес.% и с 1 вес.% до 0.9 вес.%.

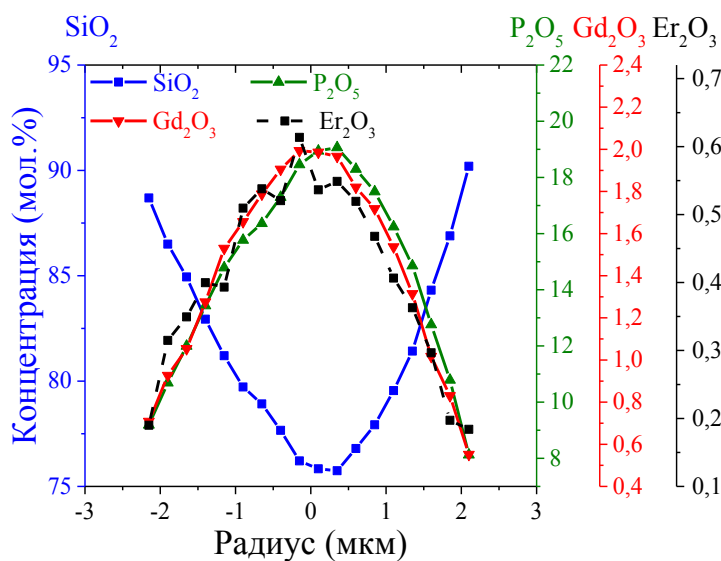


Рисунок 1 - Распределение компонентов стекла в поперечном сечении сердцевины волокна (3 вес.% Er, диаметр 100 мкм).

имеют уникальный состав сердцевины, не исследованный ранее.

Измерены спектры поглощения и усиления слабого сигнала, время жизни основного лазерного уровня, затухание и профили показателя преломления световодов. Длина волны отсечки оценена теоретически из профилей показателя преломления. Параметры эрбиевых световодов представлены в Таблице 1.

Благодаря кварцевой оболочке, сварки композитных световодов (ЭС#1 и ЭС#2) с кварцевыми хорошо воспроизводились при использовании стандартного сварочного аппарата для телекоммуникационных волокон. Потери на сварках для одномодовых световодов составляли от 0.12 дБ до 1.1 дБ.

Концентрация оптически активных и пассивных редкоземельных ионов в сердцевине исследованных световодов (от 0.9 до 2.4 вес.% ионов Er^{3+} и около 8 вес.% ионов Gd^{3+}), как минимум, на порядок превышает концентрации, достижимые при помощи традиционной технологии изготовления активных заготовок методом модифицированного химического парофазного осаждения. Таким образом, изучаемые композитные световоды

Таблица 1. Параметры световодов

Параметры	ЭС#1	ЭС#2
Концентрация ионов РЗЭ в заготовке волокна, вес.% (см ⁻³)	Er ³⁺ 1 (1·10 ²⁰)	Er ³⁺ 3 (3.1·10 ²⁰)
Пик поглощения слабого сигнала @980 нм, дБ/см	0.44	1.25
Пик поглощения слабого сигнала @1535 нм, дБ/см	1.4	3.65
Затухание @1100-1200 нм, дБ/м	2	4.1
Диаметр сердцевины, мкм	4.3	3.6
NA	0.265	0.288
Длина волны отсечки, нм	1490	1350
Абсолютная разница показателей преломления	0.024	0.028
Время жизни, мс	6.63	6.63

Er³⁺/Yb³⁺ световоды имели квадратное поперечное сечение внутренней световедущей оболочки со сторонами 100x100 мкм и 80x80 мкм, а диаметры сердцевины - 13.5 мкм (ЭС#3) и 10.5 мкм (ЭС#4), соответственно. Световоды были многомодовыми в области рабочего диапазона длин волн.

После вытяжки концентрация оксида фосфора в сердцевине снизилась до 30 моль%, концентрация оксида кремния составила 50 моль%, оксида иттербия – 4-5 моль%.

Оптические потери в области длин волн 1.2 – 1.3 мкм составили 2 дБ/м. Поглощение в сердцевине на длине волны 1535 нм составило около 1.5 дБ/см. Время жизни 7.6 мс. Потери на сварке с SMF28 были от 1.7 дБ до 3.7 дБ.

В **третьей главе** представлены экспериментальные результаты исследования различных конфигураций суперлюминесцентных волоконных источников излучения (СВИ) на основе композитных световодов. Проведено измерение спектров излучения и выходной мощности при различных мощностях накачки и различных длинах активных световодов.

Максимальная выходная мощность однопроходного СВИ с встречной накачкой на основе одномодового световода ЭС#2 длиной всего 45 см составила около 30 мВт (рис. 2). А использование Er³⁺/Yb³⁺ волокна ЭС#3 длиной 1.5 м и накачки по оболочке от лазерного диода (мощностью 7 Вт) в аналогичной конфигурации СВИ позволило получить выходную мощность до 100 мВт.

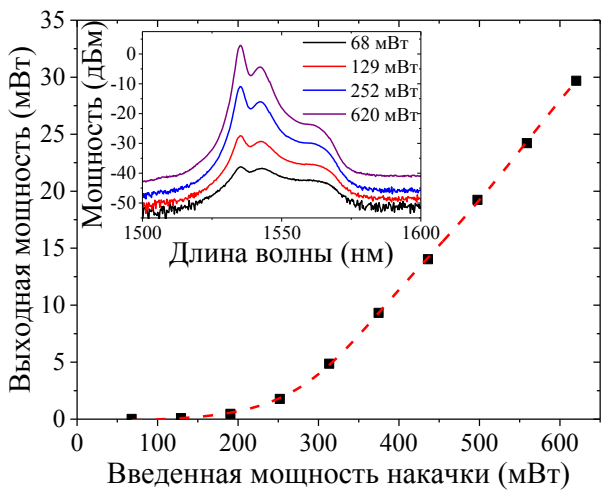


Рисунок 2 – Зависимость выходной мощности однопроходного СВИ от длины световода ЭС#2.

люминесцентный сигнал, интенсивность которого во всех экспериментах была более чем на 2 порядка меньше интенсивности усиленного спонтанного излучения (УСИ) от ионов эрбия.

Также была исследована двухпроходная схема с композитным волокном, легированным 3 вес. % ионов эрбия. Показано, что данная схема оказывается очень чувствительной к обратным отражениям, за счет которых в схеме возникает режим лазерной генерации. Поэтому максимальная выходная мощность УСИ в двухпроходной схеме была порядка 19.5 мВт при мощности введенной накачки 200 мВт и длине световода 29 см.

Также в главе представлены автокорреляционные функции (АКФ) УСИ, полученные с помощью быстрого обратного Фурье-преобразования спектров излучения. Установлено, что наиболее близкая к идеальной форма АКФ может быть получена, когда в спектре УСИ имеется один интенсивный пик. Длина когерентности (по уровню -3 дБ) при этом составила от 50 до 130 мкм. Этого достаточно для некоторых применений, однако хуже в сравнении с СВИ на основе эрбиевых кварцевых световодов с алюмосиликатной матрицей.

В **четвертой главе** представлено исследование эрбиевых волоконных усилителей. Первый раздел четвертой главы посвящен усилению непрерывного сигнала в композитных световодах.

Спектры излучения в обоих случаях имели сложную форму с двумя пиками на длинах волн 1535 нм и 1543 нм и шириной на полувысоте порядка 2 нм и 5 нм, соответственно. Дополнительное легирование фосфатной сердцевины ионами иттербия не оказало влияния на форму спектров СВИ в области 1.5 мкм. Кроме того, в диапазоне излучения ионов иттербия наблюдался только слабый

Для исследования усиления одномодовых композитных световодов, ЭС#1 и ЭС#2, (раздел 4.1.1) была использована схема однопроходного эрбиевого волоконного усилителя с попутной накачкой. Излучение накачки (976 нм) и усиливаемого сигнала (1536 нм) вводилось в сердцевину Er^{3+} световодов через спектрально-селективный ответвитель (ССО). Композитный световод был соединен с общим выходом ССО при помощи сварного соединения.

Выходные характеристики усилителя были исследованы для серии длин волокон, легированных Er^{3+} : от 10 до 50 см при изучении ЭС#2, и от 20 до 70 см - в случае ЭС#1.

На выходе усилителя осуществлялось измерение мощности и спектров излучения. Характеристики усиления были изучены для различных мощностей входного сигнала (от -30 дБм до 7 дБм) во всём доступном диапазоне мощностей накачки.

Поскольку выходной спектр включает помимо усиленного сигнала спонтанное излучение в области люминесценции ионов эрбия, для определения коэффициента усиления сигнала по выходным спектрам оценивались доли мощностей, соответствующие усиливаемому сигналу и усиленному спонтанному излучению, и коэффициент усиления оценивался как:

$$G_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{out}} - P_{\text{ASE}}}{P_{\text{in}}} \right) \quad (1)$$

где P_{out} - мощность излучения на выходе, мВт; P_{ASE} - мощность усиленного спонтанного излучения (ASE), мВт; а P_{in} - мощность входного сигнала, мВт. Мощность усиленного спонтанного излучения оценивалась по измерениям выходного спектра усилителя.

На рисунке 3 показаны коэффициенты усиления в зависимости от длины активных световодов для нескольких уровней мощности входного сигнала (при одинаковой мощности накачки 280 ± 5 мВт). Как видно из рисунка 3 коэффициенты усиления в волокне, легированном 1 вес.% Er^{3+} , выше, чем в волокне, легированном 3 вес.% Er^{3+} , при той же введенной мощности накачки. Зависимость эффективности усиления от концентрации активных ионов связана с кооперативными эффектами между ионами Er^{3+} .

Максимальные значения усиления были получены при длинах световодов, легированных 1 и 3 вес.% эрбия, 50 см и 20 см, соответственно. Для обоих световодов максимальный коэффициент усиления входного сигнала -30 дБм составил около 38 дБ на длине волны 1536 нм. Подавление усиленного спонтанного излучения превышало 20 дБ для усиления сигнала -30 дБм во всем исследуемом диапазоне мощности накачки.

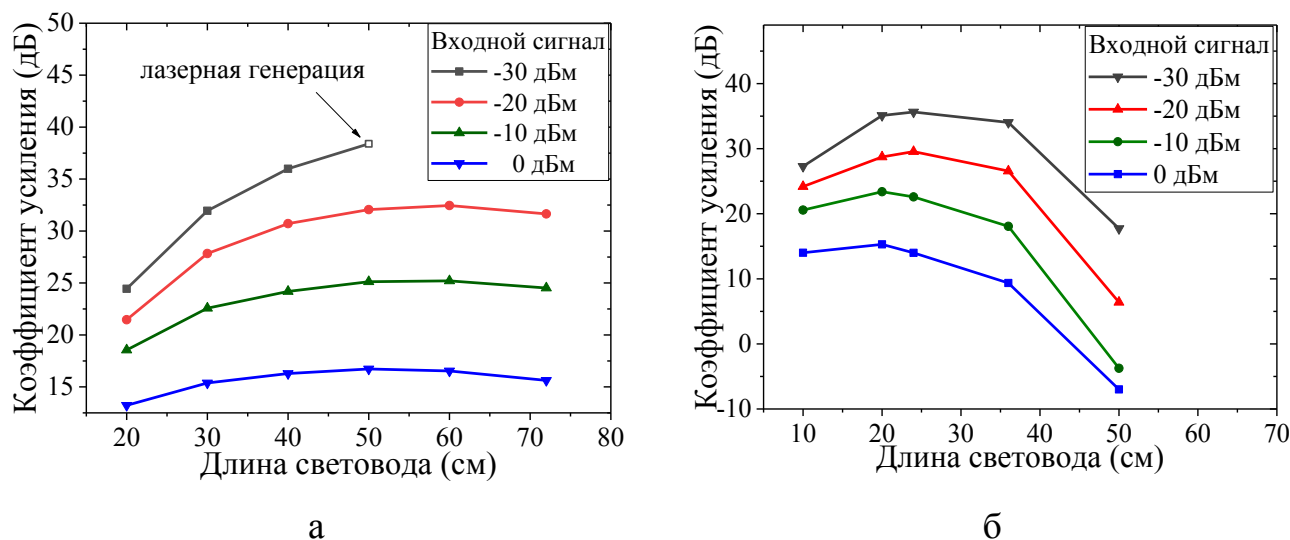


Рисунок 3 – Коэффициент усиления сигнала 1536 нм в зависимости от длин композитного волокна, легированного 1 вес.% (а) и 3 вес.% (б) Er (мощность накачки на 976 нм составляла 280 ± 5 мВт).

Максимальный коэффициент усиления на единицу длины был продемонстрирован в световоде, содержащем 3 вес.% Er^{3+} , длиной 10 см, и он составлял 3.1 дБ/см. Экспериментально полученный коэффициент усиления на единицу длины близок к значениям, полученным для полностью фосфатных волокон (от 3 до 5 дБ/см).

Для оптимальных длин активных световодов была исследована зависимость усиления от мощности накачки, выполнена оценка выходной мощности насыщения и шум-фактора. Результаты исследования показывают, что разработанные одномодовые композитные световоды перспективны для создания полностью волоконных компактных усилителей.

Вторая часть раздела (пункт 4.1.2) посвящена исследованию усиления непрерывного сигнала (1550 нм) в композитных световодах, легированных системой эрбий-иттербий.

Наилучшие результаты были получены для световода ЭС#3 длиной 23 см с внутренней кварцевой оболочкой 100x100 мкм и для световода ЭС#4 длиной 36 см с внутренней кварцевой оболочкой 80x80 мкм. Для усилителя на основе ЭС#3 максимальное усиление порядка 11.5 дБ получено при мощности сигнала 0.5 мВт, удельное усиление составило около 0.5 дБ/см.

Максимальное значение коэффициента усиления полностью волоконного усилителя с ЭС#4 составило около 13.5 дБ для входного сигнала на 1550 нм мощностью 0.37 мВт и около 9 дБ для сигнала мощностью 2 мВт.

Второй раздел четвертой главы посвящен исследованию усиления ультракоротких импульсов. В качестве источника сигнала был использован волоконный лазер с синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации с основной частотой 83.3 МГц и длительностью импульса 490 фс. Задающий лазер благодаря гармонической синхронизации мод также работал на частоте 250 МГц с длительностью импульса 615 фс. Исследовано усиление в световоде, легированном 1 вес.% ионов эрбия, длиной 20 см.

На выходе усилителя проводилось измерение длительности импульсов, частоты следования импульсов, средней мощности и спектров излучения. Выходные спектры были измерены со спектральным разрешением 0.1 нм. Частота следования импульсов определялась на высокоскоростном осциллографе (500 MHz). Длительность импульсов измерена на оптическом автокорреляторе.

Коэффициенты усиления импульсного сигнала были приблизительно на 2 дБ ниже усиления непрерывного сигнала той же средней мощности.

Исследование выходных спектров позволило обнаружить генерацию новых спектральных частот при усилении УКИ (рис. 4(a)), что связано с достижением пороговой интенсивности возникновения нелинейных эффектов. Анализ зависимости пиковой мощности и спектров излучения при различных мощностях накачки позволил экспериментально установить порог возникновения нелинейных

эффектов, который составил около 120 Вт. С учетом диаметра модового поля, пороговая интенсивность составляет около 6.5×10^8 Вт/см² (что соответствует нелинейному показателю преломления 1.43×10^{-19} м²/Вт).

Для обоих режимов генерации УКИ лазера наблюдалось уменьшение длительности импульсов с увеличением мощности накачки (рис. 4(б)). Пунктирной линией на графике указано расчетное значение длительности импульсов на входе в активный световод с учетом дисперсии пассивных компонентов усилителя. Длительность импульсов уменьшилась до исходного значения при усилении порядка 7 ± 1 дБ.

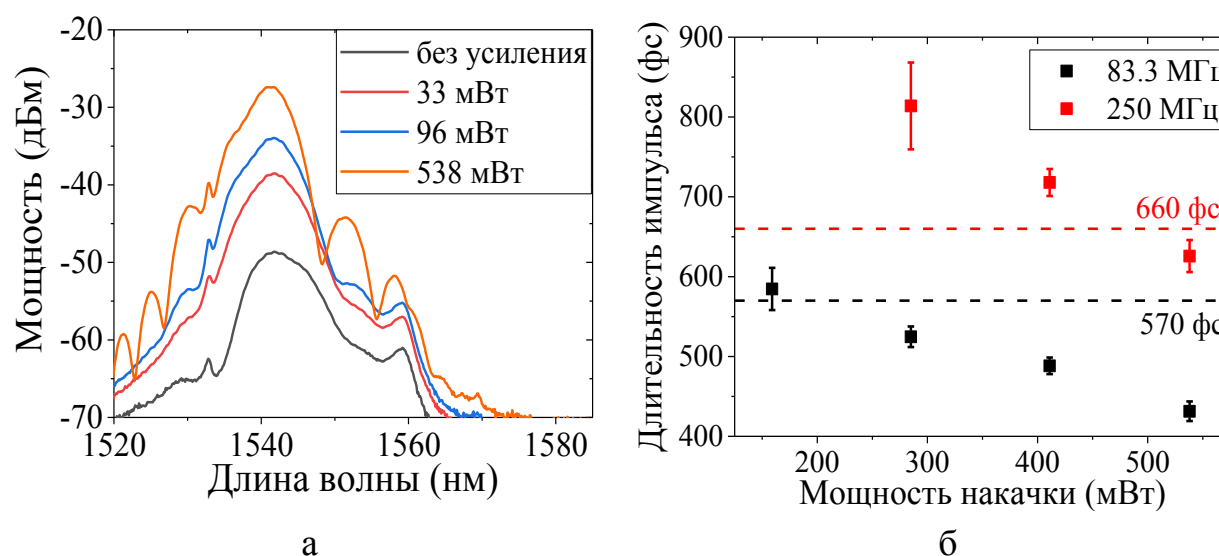


Рисунок 4 - Динамика спектров усиленного излучения 83.3 МГц (а), зависимость длительности импульсов от мощности накачки усилителя (б).

При максимальной мощности накачки длительность импульсов для режима № 1 составила 431 фс, энергия импульса составила 0.44 нДж, пиковая мощность увеличилась до 1.024 кВт, и для режима № 2 данные параметры, соответственно, равнялись 625 фс, 0.15 нДж и 246 Вт.

Третий раздел четвертой главы посвящен исследованию изменения фазовой модуляции УКИ в усилителе на основе композитного световода, легированного 3 вес.% ионов эрбия (ЭС#2), длиной 20 см.

В качестве задающего генератора был использован импульсный лазер с центральной длиной волны 1555 нм, длительностью импульса 1.59 пс и средней мощностью 4.4 мВт. Импульсы были близки к спектрально-ограниченным, параметр

ТВР составил около 0.37. Частота следования импульсов составляла 3.8 МГц. Пиковая мощность до усиления составляла 0.73 кВт, а энергия импульса 1.2 нДж.

На выходе из усилителя проводилось измерение выходной мощности и автокорреляционных спектров при различных мощностях накачки. Были оценены коэффициенты усиления, длительность импульсов, ширина спектра на половине высоты, ТВР, частотная модуляция, пиковая мощность и энергия импульса. Усиленное излучение доставлялось к измерительному оборудованию через волоконно-оптический ответвитель из стандартного световода SMF28, длина которого составляла около 3 м.

При усилении УКИ в композитном световоде во всем диапазоне мощностей наблюдалось уширение спектра, которое может быть обусловлено фазовой самомодуляцией. При мощности накачки менее 120 мВт и более 220 мВт наблюдался распад импульса, а в диапазоне от 120 мВт до 220 мВт напротив – сжатие (рис. 5(а)). После УКИ наблюдалась линейная отрицательная частотная модуляция (рис. 5(б)).

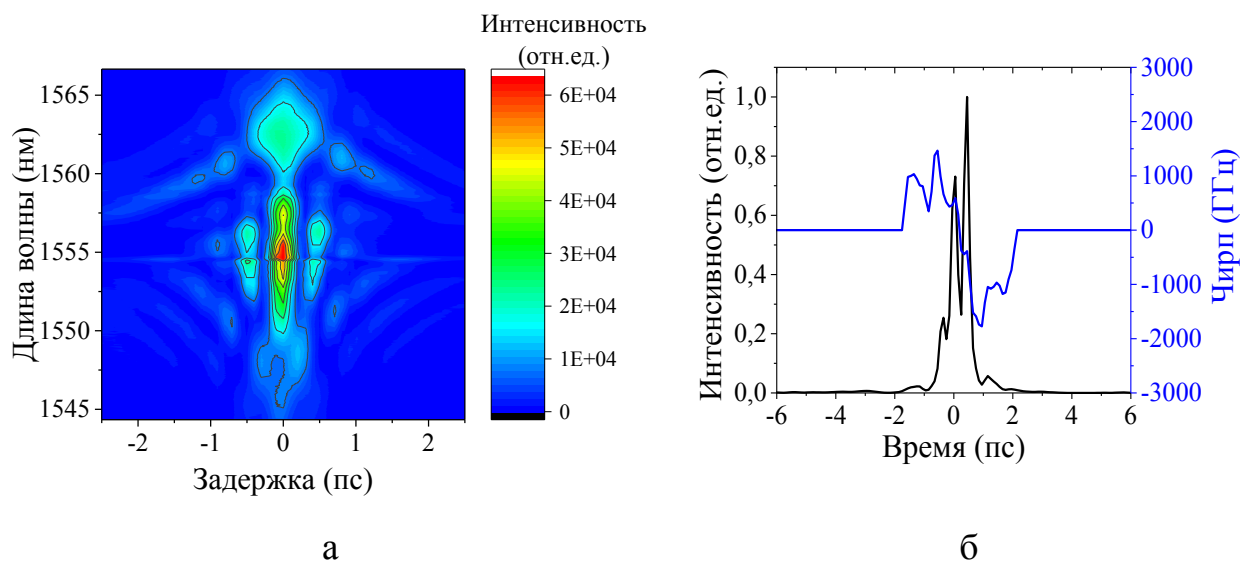


Рисунок 5 – Параметры импульсного усиленного УКИ при мощности накачки усилителя 220 мВт: FROG-спектрограмма (а), автокорреляционная функция и частотная модуляция импульса (б).

Показана возможность изменения длительности импульса в зависимости от мощности накачки волоконного усилителя. Получено нелинейное сжатие импульса в активном волокне с 1.59 пс до 270 фс, увеличение энергии импульса с 1.2 нДж до 8 нДж и пиковой мощности с 0.73 кВт до 28 кВт.

В пятой главе представлено исследование волоконных лазеров на основе композитных световодов. Первый раздел пятой главы посвящен непрерывной лазерной генерации композитных световодов.

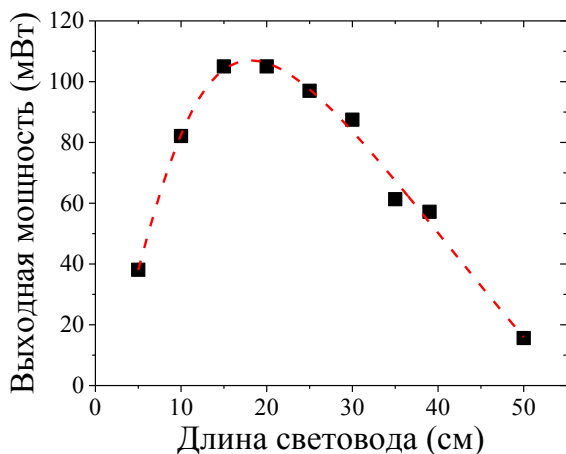
При исследовании композитного световода, легированного 3 вес.% Er^{3+} , излучение накачки на 976 нм вводилось в сердцевину активного световода через ССО. Длина ЭС#2 изменялась от 5 см до 50 см.

В случае $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ композитного световода (ЭС#3) излучение накачки 971 нм от лазерного диода с многомодовым выходом и мощностью до 4.5 Вт вводилось в световедущую оболочку с помощью объединителя накачки. Длина световода в эксперименте составляла 36 см.

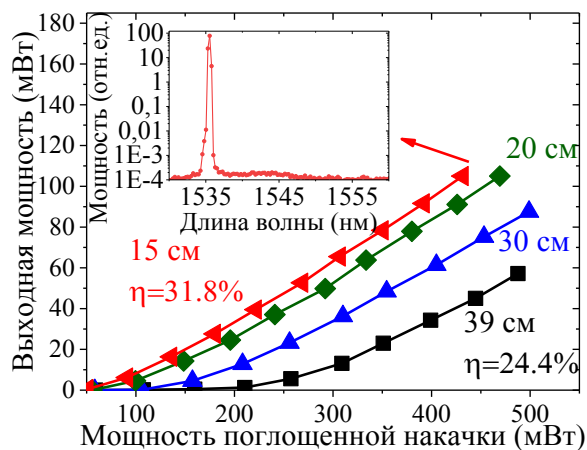
Лазерный резонатор был образован волоконной брэгговской решеткой с коэффициентом отражения близким к 1 на 1536 нм с одной стороны и торцом волокна, сколотым под прямым углом, с другой ($R \approx 0.04$).

В эксперименте проводилось измерение спектральных и амплитудно-временных характеристик выходного излучения, а также интегральной мощности для разных мощностей накачки.

Для световода, легированного 3 вес.% эрбия, выполнена оптимизация длины. На рисунке 6(а) представлена зависимость максимальной выходной мощности источника излучения при максимальной введенной мощности накачки 510 мВт от длины активной среды.



а



б

Рисунок 6 – Зависимость выходной мощности от длины активного световода ($P_{\text{pump}} = 510$ мВт) (а); от мощности накачки ($l = 15$ см) (б).

Максимальная дифференциальная эффективность и выходная мощность непрерывного лазера достигнуты при длине световода 15 см (рис.6(б)). Дифференциальная эффективность по отношению к поглощенной мощности накачки составила около 32 %. При учете потерь на сварке, которые для данного эксперимента составили порядка 1 дБ, эффективность световода составит порядка 39 %.

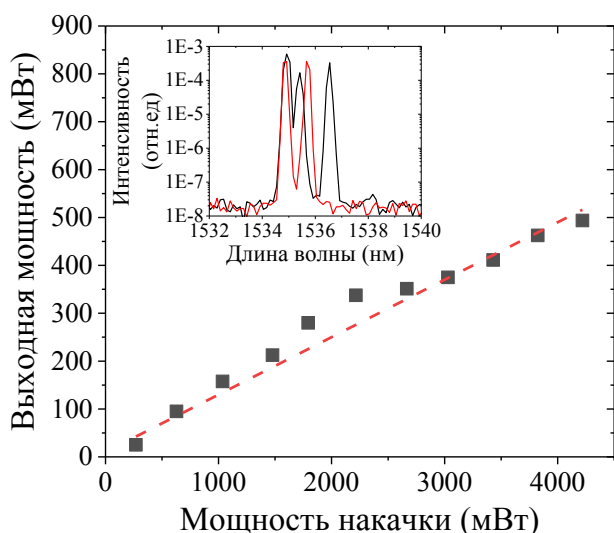


Рисунок 7 – Параметры непрерывного лазера с накачкой в оболочку.

наличие нескольких поперечных мод на рабочей длине волны привели к нестабильности спектральных характеристик лазерной генерации.

В отрезке $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ волокна длиной 36 см продемонстрирована возможность получения более высокой выходной мощности непрерывной лазерной генерации до 500 мВт (рис.7) за счет накачки в оболочку в полосу поглощения ионов иттербия.

Однако увеличенный диаметр сердцевинки значительно ухудшил сварку с кварцевыми световодами. Поэтому дифференциальная эффективность составила 11%. Отражения на сварке и

Второй раздел пятой главы посвящен исследованию импульсной лазерной генерации одномодового композитного световода, легированного 3 вес.% ионов эрбия.

Для получения импульсного режима генерации выбран метод синхронизации мод за счет нелинейного вращения плоскости поляризации.

В работе была использована традиционная схема кольцевого лазера. В качестве активной среды использован одномодовый световод, легированный 3 вес.% ионов эрбия. Длина световода варьировалась от 7 до 19 см. Общая длина кольцевого резонатора составляла около 8.5 м, основная частота равнялась порядка 24 МГц. Все пассивные волокна в резонаторе имели аномальную дисперсию в области генерации ионов эрбия.

Проведено исследование мощностных, спектральных, амплитудно-временных и шумовых характеристик лазера. Спектр излучения снят при помощи анализатора оптического спектра с разрешением 0.1 нм.

Измерение амплитудно-временных характеристик выполнено при помощи быстродействующего InGaAs-фотодетектора с волоконным входом и высокочастотного (до 500 МГц) быстродействующего осциллографа.

Шумовые характеристики измерены с помощью широкополосного (0÷3 ГГц) радиочастотного анализатора спектра. Для измерения длительности фемтосекундных импульсов использовался интерференционный автокоррелятор на основе интерферометра Майкельсона.

Экспериментально получены наиболее высокая стабильность следования импульсов, наименьшая частотно-фазовая модуляция импульсов и наилучшее отношение сигнал-шум с использованием 7 см отрезка высококонцентрированного световода. На рисунке 8 представлен спектр излучения и автокорреляционная функция.

Полученная форма спектра имеет характерные для солитонного режима пики Келли. Увеличение мощности накачки приводило к увеличению частоты, а не к росту энергии импульсов, что также указывает на солитонный режим, который может существовать в узком энергетическом диапазоне импульсов,

обеспечивающем компенсацию дисперсии резонатора. Длительность импульсов, измеренная с помощью автокоррелятора, составила около 480 фс.

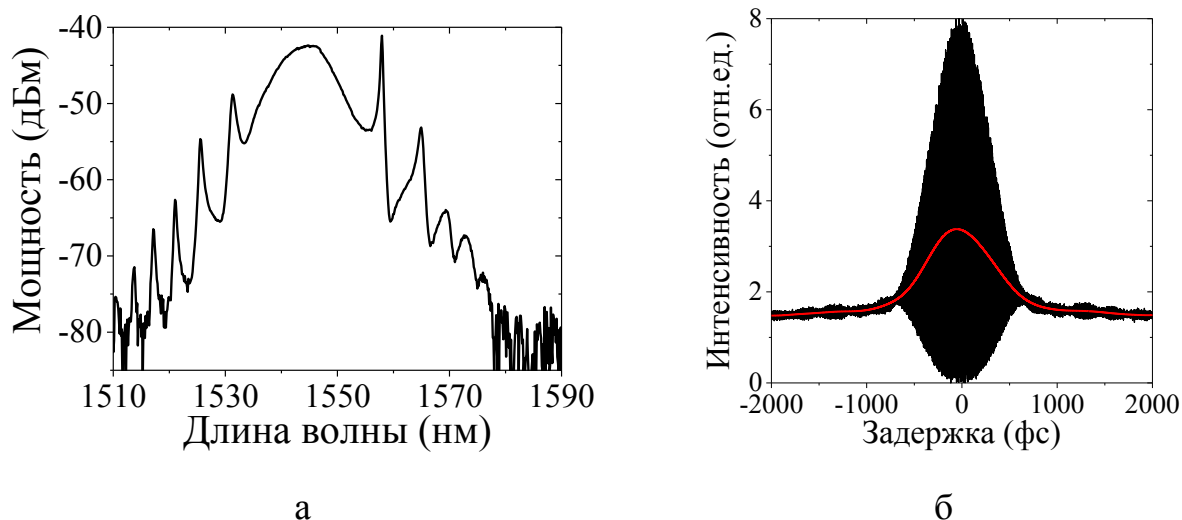


Рисунок 8 – Спектр излучения (а) и автокорреляционная функция (б) выходного излучения.

Используя данные о положении пиков Келли $\Delta\nu_{\text{Kelly},N}$ и длительности импульсов τ_s , определена дисперсия групповой задержки (GDD) резонатора.

Дисперсия групповой задержки резонатора лазера составила около $-0,093 \text{ пс}^2$. GDD исследуемого композитного волокна, легированного Er, составила около $0,066 \text{ пс}^2$. Соответствующий параметр дисперсии равняется порядка -300 пс/нм/км . Это на порядок выше по сравнению с традиционными Er-легированными волокнами.

Средняя выходная мощность равнялась порядка 2.2 мВт. Таким образом, энергия одиночного импульса составляла 90 пДж, а пиковая мощность 190 Вт.

На рисунке 9 представлен радиочастотный (РЧ) спектр лазера вблизи основной частоты. Отношение сигнал/шум составило около 50 дБ. Во вставленном графике представлен радиочастотный спектр в диапазоне частот от 0 до 1 ГГц. Можно видеть,

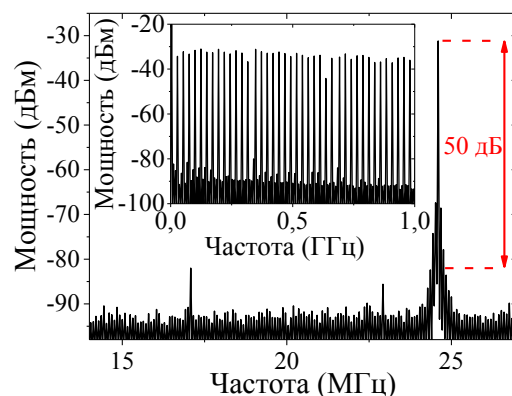


Рисунок 9 – РЧ - спектр лазера вблизи основной частоты.

что реализованный лазер имеет достаточно хорошую стабильность.

В третьем разделе пятой главы представлено исследование импульсных лазеров на основе композитного световода, легированного системой эрбий-иттербий, длиной от 31 до 36 см. Волокно накачивалось в оболочку. Однако из-за многомодовости световода на рабочей длине волны импульсный режим генерации на основной частоте резонатора 8.7 МГц был получен только для случая активной синхронизации мод. Длительность импульсов варьировалась от 1 до 1.4 нс, выходная мощность достигала порядка 20 мВт. В спектрах излучения наблюдались узкие и интенсивные пики. Поэтому возможно наличие непрерывного излучения. Максимальная энергия импульса достигала 5 нДж, а пиковая мощность – 2.5 Вт.

В заключении представлены основные выводы к работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Использование композитных световодов, легированных 3 вес.% ионов эрбия, обеспечивает выходную мощность УСИ, близкую к значениям мощности СВИ на основе кварцевых эрбиевых световодов (около 30 мВт), при длине активного световода 45 см, на порядок меньшей в сравнении со стандартными эрбиевыми волокнами. Использование солегирования иттербием совместно с накачкой в оболочку позволяет в несколько раз увеличить спектральную плотность мощности излучения полностью волоконных СВИ (до 100 мВт).

2. Использование одномодового композитного световода, легированного 3 вес.% эрбия, и накачки в сердцевину лазерным диодом с длиной волны генерации 976 нм обеспечивает высокую эффективность непрерывной лазерной генерации до 39 % на длине волны 1535 нм.

3. Использование высококонцентрированного композитного волокна, содержащего 3 вес.% ионов эрбия, длиной 20 см или волокна, содержащего 1 вес.% ионов эрбия, длиной 50 см может обеспечить коэффициент усиления в 38 дБ для сигнала мощностью 1 мкВт при значительном подавлении усиленного спонтанного излучения. В случае высококонцентрированного композитного световода,

легированного 3 вес.% ионов эрбия, достигается удельный коэффициент усиления до 3.1 дБ/см, близкий к значениям для полностью фосфатных световодов.

4. Исследовано усиление импульсного сигнала в композитных световодах. В световоде, легированном 1 вес.% ионов эрбия, определена пороговая интенсивность возникновения нелинейных эффектов, которая составила около 6.5×10^8 Вт/см².

При усилении импульсного сигнала в композитном световоде, содержащем 3 вес.% ионов эрбия, длиной 20 см продемонстрирована спектрально-временная динамика нелинейного сжатия импульса длительностью 1,59 пс до 270 фс. Установлено, что сокращение длительности импульса зависит от инверсии населенности активной среды усилителя.

5. Использование высококонцентрированного световода, содержащего 3 вес.% эрбия, длиной 7 см позволяет создать стабильный фемтосекундный волоконный лазер с синхронизацией мод за счет нелинейной эволюции плоскости поляризации с длительностью импульсов порядка 480 фс и отношением сигнал-шум более 50 дБ.

6. В результате изучения элементного состава сердцевины композитного волокна и оптических характеристик лазеров и усилителей на основе данных волокон установлено, что высокая эффективность усиления и лазерной генерации композитных световодов достигается даже при высоком содержании оксида кремния (от 50 до 75 мол.%) в легированной эрбием сердцевине.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Поносова, А.А.** Широкополосный волоконный эрбиевый источник / А.А. Поносова, О.Л. Кель, А.И. Семерикова, А.С. Курков //Фотон-экспресс. - 2015. – Т. 126. - № 6. - С. 91-92.
2. Галаган, Б.И. Широкополосный волоконный источник ИК излучения на основе высоколегированного $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ композитного оптического волокна с накачкой в оболочку/Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, О.Н. Егорова, В.А. Камынин, **А.А. Поносова**, С.Е. Сверчков, С.Л. Семенов, В.Б. Цветков//Прикладная фотоника. – 2016. – Т.3 - № 2. – С. 146-157.
3. Галаган, Б.И. Усилитель на основе высоколегированного $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ композитного оптического волокна/ Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, О.Н. Егорова, В.А. Камынин, **А.А. Поносова**, С.Е. Сверчков, С.Л. Семенов, В.Б. Цветков //Фотон-экспресс. - 2017. -№ 6 (142). - С. 35-36.
4. Denker, B. I. Infrared broadband all-fiber light source based on high-concentration $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ composite double-clad fiber/B.I. Denker, O.N. Egorova, B.I. Galagan, V.A. Kamynin, **A.A. Ponosova**, S.E. Sverchkov, S.L. Semjonov and V.B. Tsvetkov//Laser Physics Letters. – 2017. – Vol. 14. – №. 7. – 075101(4pp).
5. Галаган, Б.И. Композитные световоды с Er/Yb фосфатной сердцевиной и двойной кварцевой оболочкой для компактных усилителей/Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, О.Н. Егорова, В.А. Камынин, **А.А. Поносова**, С.Е. Сверчков, С.Л. Семенов, В.Б. Цветков// Квантовая электроника. – 2018. – Т.48. - № 6. – С. 550 – 553.
6. Denker, B. I. Femtosecond laser based on a multicomponent fiber with a 3 wt.% Er-doped phosphate core and silica cladding/B.I. Denker, B.I. Galagan, V.A. Kamynin, **A.A. Ponosova**, S.E. Sverchkov, S.L. Semjonov and V.B. Tsvetkov//Laser Physics Letters. – 2019. – Vol. 16. - № 8. – 085103 (4 pp).
7. Denker, B. I. Gain characteristics of fibers with a heavily erbium-doped phosphate-based core and silica cladding/B. I. Galagan, V. A. Kamynin, **A. A. Ponosova**, K. E. Riumkin, S. L. Semjonov, S. E. Sverchkov, and V. B. Tsvetkov //J. Opt. Soc. Am. B. - 2019. - Vol. 36. - № 10. - P. 2705-2711.
8. Галаган, Б.И. Источники излучения на основе высококонцентрированных эрбиевых композитных световодов/Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, В.А. Камынин, **А.А. Поносова**, С.Е. Сверчков, С.Л. Семенов, В.Б. Цветков// Фотон-экспресс. - 2019. -№ 6. - С. 214-215.