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

На правах рукописи

### Поносова Анастасия Александровна

# Источники излучения на основе высококонцентрированных эрбиевых композитных световодов

01.04.21 – Лазерная физика

## ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

доктор физико-математических наук В.Б. Цветков

Москва – 2021

## Содержание

Введение	4
Глава 1. Новые перспективные активные среды в волоконной оптике д	цля
спектрального диапазона 1525 – 1565 нм (обзор литературы)	11
1.1 Активные световоды для спектрального диапазона 1525 – 1565 нм	11
1.1.1 Спектрально-люминесцентные свойства эрбиевых световодов	11
1.1.2 Спектрально-люминесцентные свойства эрбий-иттербиевых световодов	14
1.1.3 Выводы к разделу	17
1.2 Суперлюминесцентные волоконные источники излучения	18
1.2.1 Основные конфигурации СВИ	18
1.2.2 СВИ на основе кварцевых эрбиевых световодов	20
1.2.3 СВИ на основе высококонцентрированных эрбиевых световодов	21
1.2.4 Выводы к разделу	24
1.3 Эрбиевые волоконные усилители	24
1.3.1 Усиление слабого сигнала в высококонцентрированных фосфатн световолах	ых 26
132 Усиление импульсного дазерного излучения в высококонцентрировани	ых
фосфатных световолах	28
1.4 Эрбиевые волоконные лазеры	30
1.4.1 Непрерывные волоконные лазеры	30
1.4.2 Импульсные волоконные лазеры	33
1.5 Выводы к главе I	36
Глава 2. Исследование свойств композитных световодов	c
высококонцентрированной фосфатной сердцевиной в кварцевой оболочке	37
2.1 Технология изготовления композитных световодов [44, 159, 160]	37
2.2 Композитные световоды, легированные ионами эрбия	38
2.2.1 Элементный состав сердцевины эрбиевых композитных световодов	40
2.2.2 Оптические свойства эрбиевых композитных световодов	41
2.2.3 Спектры поглощения и усиления эрбиевых композитных световодов	42
2.2.4 Оценка радиационного времени жизни метастабильного уров	ЗНЯ
композитных световодов, легированных эрбием	43
2.3 Композитные световоды с фосфатной сердцевиной, легированной систем	юй
эрбий-иттербий [44]	48
2.4 Выводы к главе II	50
Глава 3. Суперлюминесцентные волоконные источники излучения	52
3.1 Требования к параметрам источников излучения для низкокогерентн	юй
интерферометрии	52
3.2 СВИ на основе композитных световодов	54
$3.2.1$ СВИ на основе $Er^{-1}$ композитных световодов	55
3.2.2 СВИ на основе Er <sup>-/</sup> /Yb <sup></sup> композитных световодов с накачкой в оболочку	66 70
<i>3.3</i> Выводы к главе III	/9
I лава 4. Эроиевые волоконные усилители	80
4.1 Усиление непрерывного сигнала в композитных световодах	80
4.1.1 Волоконные усилители с накачкой в сердцевину	80

4.1.2 Волоконные усилители с накачкой в оболочку	90
4.1.3 Выводы к разделу	96
4.2 Исследование усиления импульсного излучения в одномодовых компози	тных
световодах	97
4.2.1 Параметры схемы эксперимента	97
4.2.2 Результаты и обсуждение	99
4.3 Исследование изменения фазовой модуляции УКИ при усилении	105
4.4 Выводы к главе IV	111
Глава 5. Волоконные лазеры на основе композитных световодов	113
5.1 Непрерывная лазерная генерация композитных световодов	113
5.2 Импульсная лазерная генерация одномодового композитного световода	119
5.2.1 Экспериментальная схема и методики измерений	119
5.2.2 Результаты и обсуждение	121
5.3 Импульсные волоконные лазеры на основе Er/Yb композитного светово	ода с
накачкой в оболочку	128
5.3.1 Экспериментальная схема и методика эксперимента	128
5.3.2 Результаты и обсуждение	129
5.4 Выводы к главе V	135
Заключение	136
Приложение 1 Перевод концентрации из весовых процентов в ионы на см <sup>3</sup>	138
Приложение 2 Влияние волоконных компонентов на длительность импульсов	. 139
Благодарности	141
Список публикаций по теме диссертации	142
Список сокращений	. 146
Список использованной литературы	147

#### Введение

Настоящая работа посвящена исследованию композитных световодов с сердцевиной из высококонцентрированного фосфатного стекла в кварцевой оболочке для волоконных источников излучения в спектральном диапазоне 1525 – 1565 нм. Сердцевина световодов содержала концентрации ионов редкоземельных элементов на порядок выше в сравнении с традиционными кварцевыми оптическими волокнами, что позволило создать и исследовать волоконные источники излучения с короткой длиной активной среды. Особое внимание уделено исследованию эффективности усиления и лазерной генерации высококонцентрированных композитных световодов.

#### 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 они незаменимы во многих областях науки и техники, в частности, для передачи информации по волоконным линиям связи [1], для интерферометрических датчиков физических величин [2], научного приборостроения [3] и др. [4-8].

Первый успешный эксперимент по усилению излучения в кварцевых световодах, легированных эрбием, был продемонстрирован научной группой из Саутгемптона под руководством Д. Пэйна в 1987 г. [9]. Благодаря тому, что спектральный диапазон люминесценции ионов эрбия совпал с минимальными оптическими потерями кварцевых оптических волокон, разработка И исследование эрбиевых оптических волокон представляли значительный интерес для волоконных линий связи. Как следствие, за короткое время были проведены экспериментальные и теоретические исследования, подтвердившие практическую возможность создания компактного, обладающего хорошими характеристиками волоконного усилителя [10-12], и уже в 1992 г. на рынке появились готовые для применения модули таких усилителей.

За последующие три десятилетия удалось достичь значительного прогресса Были найдены подходы к достижению в этой области. максимальной эффективности преобразования излучения накачки в излучение генерации эрбиевых световодов. Было показано, что ДЛЯ предотвращения концентрационного тушения люминесценции и миграции возбуждения между ионами эрбия, характерными для чисто кварцевого стекла [13, 14], необходимо дополнительно легировать кварцевое стекло модификаторами (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, GeO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, лантоноиды и др.) [15, 16], а также поддерживать некоторое соотношение между концентрациями ионов эрбия и модификаторов. Наиболее эффективными добавками оказались оксиды фосфора [17] и алюминия [18-20]. Их использование позволило повысить концентрацию ионов эрбия до 0.1-0.4 вес.% без негативного обмена энергией возбуждения между ионами эрбия.

Интерес к увеличению концентрации активных ионов в световодах поддерживается по настоящее время [21-23]. Это обусловлено потенциальной возможностью улучшения параметров волоконных источников излучения за счет сокращения длины активного волокна. В случае усилителей импульсного излучения предполагается снижение нежелательных нелинейных эффектов (фазовой самомодуляции, вынужденного комбинационного рассеяния И Мандельштама-Бриллюэна) [21]. вынужденного рассеяния Использование высококонцентрированных волоконных сред должно облегчить активных создание одночастотных лазеров с высокой средней мощностью [24] и импульсных лазеров с высокой частотой повторения импульсов [25-27]. Кроме того, с точки зрения практичности в эксплуатации востребовано уменьшение габаритов волоконных источников, в особенности, эрбиевых усилителей для телекоммуникационных сетей.

Перспективными для создания высококонцентрированных активных волоконных сред считаются фосфатные [28, 29], теллуритные [30, 31], силикатные и другие многокомпонентные оксидные стёкла, позволяющие вводить на порядок большее количество редкоземельных элементов по сравнению с

кварцевыми без возникновения негативных процессов обмена энергией между активными ионами [28].

Вместе с тем, если обратиться к опыту эксплуатации активных объемных элементов из оксидных стекол в лазерах различного назначения, то становится очевидным преимущество фосфатных стекол по совокупности параметров – интенсивности оптических переходов, ширине полос и квантовому выходу люминесценции [32, 33]; лучевой стойкости [33]; сочетанию термооптических и лазерных характеристик [32], а также технологичности синтеза [33].

Таким образом, актуальным является исследование фосфатных активных волоконных сред с высокими концентрациями ионов редкоземельных элементов, для источников излучения в спектральной области 1525-1565 нм.

#### Степень разработанности темы.

Многочисленные работы последних двадцати лет [24, 34-41] посвящены исследованию активных оптических волокон из многокомпонентных фосфатных стекол. В ряде работ [38-41] продемонстрированы высокие коэффициенты усиления на единицу длины (от 3 до 5.2 дБ/см) полностью фосфатных световодов без возникновения значительного концентрационного тушения.

Однако к основным проблемам использования фосфатных активных световодов относятся низкая стойкость фосфатных стекол к атмосферной влаге и сложность их сварки с подводящими кварцевыми оптическими волокнами, что полностью Поэтому препятствует созданию волоконных источников. В большинстве работ, посвященных исследованию фосфатных известных оптических волокон, для ввода и вывода излучения использовались объемные оптические компоненты.

Коллективом авторов Института общей физики РАН совместно с Научным центром волоконной оптики РАН были разработаны высококонцентрированные композитные волокна с фосфатной сердцевиной в кварцевой оболочке [42-44]. Подобная конструкция оптического волокна позволяет вводить высокие концентрации редкоземельных элементов в фосфатную сердцевину без концентрационного тушения люминесценции и, одновременно, обеспечивает

высокую механическую стойкость и легкость сварки с традиционными кварцевыми волокнами благодаря кварцевой оболочке [43, 45, 46].

#### 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<sup>3+</sup> и Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 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;

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 изучения на основе композитных световодов с высококонцентрированной 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 усилителях получены высокие коэффициенты волоконных 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 6.5х10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup>. 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.

#### Теоретическая и практическая значимость.

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 сигналшум более 50 дБ.

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 и17-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.), 28<sup>th</sup> Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'19, Gyeongju, South Korea, 2019).

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 диссертационной работы.

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.

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.

Глава 1. Новые перспективные активные среды в волоконной оптике для спектрального диапазона 1525 – 1565 нм (обзор литературы)

#### 1.1 Активные световоды для спектрального диапазона 1525 – 1565 нм

#### 1.1.1 Спектрально-люминесцентные свойства эрбиевых световодов

Ионы эрбия относятся к лантаноидам и характеризуются электронной конфигурацией  $4f^{12}6s^2$ . Наиболее стабильным является трехвалентное состояние с нетронутыми электронами на уровнях 5s и 5p. Заполненные оболочки 5s и 5p экранируют энергетические уровни 4f электронов и, тем самым, ослабляют воздействие на них ионов матрицы. Поэтому положение энергетических уровней и, соответственно, спектры ионов эрбия в разных матрицах обладают значительным сходством.

На рисунке 1 схематично представлена структура энергетических уровней иона эрбия и возможные переходы между ними [13]. Под воздействием ионов матрицы, окружающих ион-активатор, вырождение атомных уровней снимается и происходит расщепление каждого уровня на «штарковские» подуровни. Таким образом, каждый энергетический уровень редкоземельного активного центра в действительности представляет собой группу из «штарковских» подуровней.

Положение подуровней, вероятность переходов между уровнями, а также времена жизни чувствительны к ионам, окружающим редкоземельный элемент (РЗЭ) [47].

В стёклах отсутствует дальний порядок и существенны вариации в строении ближайших к иону-активатору координационных сфер [33]. Поэтому оптические спектры поглощения и усиления ионов-активаторов в стекле представляют собой суперпозицию спектров ионов-активаторов с различным окружением и, как следствие, неоднородно уширены.



Рисунок 1 – Упрощенная схема энергетических уровней иона Er<sup>3+</sup>(накачка показана сплошной линией, процесс ап-конверсии штриховой линией бордового цвета; кросс-релаксация - синим и красным; безызлучательная релаксация - черный; излучательные переходы - серый; короткоживущие уровни показаны пунктирной линией [13]).

Генерация эрбиевых лазеров осуществляется по квази-трехуровневой схеме. Для создания инверсии населенности в эрбиевых световодах традиционно используют одну из полос поглощения, соответствующую переходам  ${}^{4}I_{15/2} - {}^{4}I_{11/2}$ (с пиком вблизи 980 нм) или  ${}^{4}I_{15/2} - {}^{4}I_{13/2}$  (с пиком вблизи 1530нм), основным излучательным переходом является переход  ${}^{4}I_{13/2} - {}^{4}I_{15/2}$  (1530 нм).

В общем случае, квантовая эффективность генерации определяется соотношением вероятностей вынужденного излучения и безызлучательной релаксации иона. Безызлучательная релаксация может происходить путём нескольких механизмов: многофононной релаксации, кросс-релаксации и кооперативных процессов ап-конверсии [13, 31, 48]. Динамика этих процессов зависит от состава матрицы-основы, концентрации активатора, а также технологии изготовления [49].

В преобладающем большинстве случаев исходным материалом для волоконной оптики является диоксид кремния [17]. В чистом кварцевом стекле

концентрационное тушение люминесценции наблюдается даже при низком уровне легирования ионами эрбия [14]. Для того чтобы повысить растворимость активных ионов в кварце, т.е. уменьшить вероятность образования кластеров примесных ионов, и получить максимальную эффективность генерации эрбиевых световодов, наиболее часто применяют введение таких модификаторов, как Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [18, 19, 50, 51], P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [15], GeO<sub>2</sub> [52] или их композиции [21, 22, 53, 54]. Однако если концентрация ионов эрбия в кварцевых световодах превышает  $5*10^{19}$  см<sup>-3</sup> (0.4 вес.%), процессы безызлучательной релаксации начинают оказывать существенное влияние на эффективность генерации [13].

Эрбиевые световоды, как правило, находят свое применение для маломощных источников излучения и усилителей. Излучение накачки вводится в световедущую сердцевину. Это связано с тем, что эрбиевые световоды имеют крайне низкую эффективность возбуждения ионов Er<sup>3+</sup> из-за относительно слабых полос поглощения (рис. 2) [33, 51, 55, 56], а увеличение концентрации ионов эрбия в кварцевой матрице приводит к концентрационному тушению, снижающему эффективность генерации [18, 48, 53, 57].



Рисунок 2 – Сечения поглощения ионов эрбия [58].

Помимо спектроскопических характеристик, существуют определенные технологические трудности достижения высоких концентраций ионов эрбия (более 1 вес.% [21] методом модифицированного химического парофазного осаждения, MCVD) и равномерности их распределения с помощью традиционных для изготовления преформ активных световодов методов MCVD [23], пропитки пористого слоя раствором солей [59] и др.[58].

К наиболее перспективным материалам для активных световодов относятся фосфатные стекла. За период многолетнего опыта разработки и эксплуатации активных лазерных элементов из многокомпонентных фосфатных стекол были найдены обеспечивающие составы стекол. одновременно хорошие спектроскопические (высокий квантовый выход люминесценции, ширину полос, интенсивность оптических переходов, время жизни), термооптические свойства, а также обладающие высокой лучевой стойкостью и технологичностью синтеза [32, 33]. Особый интерес для волоконной оптики представляет тот факт, что допустимый уровень легирования редкоземельными элементами фосфатных стекол в среднем на порядок выше, чем кварцевых [60]. Так, например, в работе [58] исследовано концентрационное затухание в фосфатном стекле, легированном эрбием, которое показало, что радиационное время жизни составляет 7.05 мс, а концентрация, при которой начинает наблюдаться тушение люминесценции, («quenching concentration»)  $0.99 \cdot 10^{21}$  cm<sup>-3</sup>.

#### 1.1.2 Спектрально-люминесцентные свойства эрбий-иттербиевых световодов

Для создания компактных и сравнительно мощных лазеров используют совместное легирование ионами эрбия и иттербия [61]. Ионы иттербия обладают в несколько раз большим по сравнению с ионами эрбия сечением поглощения в широком диапазоне длин волн 0.90–0.98 мкм (порядка 1.5 – 3\*10<sup>-20</sup> см<sup>2</sup>) [62] и при определенных условиях эффективно передают возбуждение ионам эрбия [63]. В данном случае накопление энергии возбуждения на верхнем лазерном уровне ионов эрбия осуществляется через канал сенсибилизации [33]. Ион эрбия обеспечивает высокое время жизни метастабильного состояния (миллисекунды), на которые происходит передача энергии [63, 64]. На рисунке 3 схематически

показаны энергетические уровни такой пары РЗЭ и возможные механизмы передачи энергии [64].

Кроме того, концентрация Yb<sup>3+</sup> даже в кварцевых световодах В фосфоросиликатной матрице может достигать 10 вес. % и более при сохранении достаточно низкого уровня оптических потерь (менее 50 дБ/км в области 1.2-Известно, эффективной 1.3 мкм). ЧТО основными условиями передачи возбуждения от ионов иттербия ионам эрбия является определенный уровень концентраций Yb<sup>3+</sup> и Er<sup>3+</sup>, а также использование фосфоросиликатной матрицы стекла. Последнее обусловлено быстрой релаксацией ионов Er<sup>3+</sup> в данной матрице с уровня, на который осуществляется первичная передача энергии от ионов Yb<sup>3+</sup>[61].

В работе [61] проведено исследование эффективности передачи энергии от ионов иттербия ионам эрбия в фосфоросиликатных световодах в зависимости от технологии изготовления и концентрации компонентов. При концентрациях эрбия выше 0.4 вес. % эффекты кластеризации становятся заметны [61], что приводит к снижению эффективности генерации даже при увеличении эффективности передачи. Показано, что использование различных способов изготовления заготовок волоконных световодов в рамках модифицированного химического парофазного осаждения (MCVD) не влияет на эффективность передачи возбуждения. Установлено, что в диапазоне концентраций активных ионов  $\mathrm{Er}^{3+} \sim 0.07-0.4$  вес. %, Yb<sup>3+</sup> ~ 0.4–8 вес. % (отношение концентраций Yb/Er ~ 5–40) эффективность передачи возбуждения зависит только от концентрации ионов иттербия и практически не зависит от концентрации эрбия. Максимальная дифференциальная эффективность генерации составила 38 % от поглощенной мощности накачки для образца, легированного 0.32 вес.% эрбия и 5.3 вес.% иттербия [61].

В Er/Yb световодах удается достичь дифференциальной эффективности генерации до 45 % или даже 50 % при средних значениях ~35 % [61].



Рисунок 3 – Упрощенная схема энергетических уровней пары эрбий/иттербий и возможные процессы передачи энергии (ESA-поглощение из возбужденного состояния; ЕТ-миграция энергии, CR-кросс-релаксация) [65].

Вместе с тем, система иттербий-эрбий является одной из наиболее изученной с точки зрения получения генерации в видимом диапазоне за счет процессов ап-конверсии. Эффективность ап-конверсии зависит от безызлучательных переходов, т.е. от энергии фононов – тепловых колебаний атомов матрицы: чем она ниже, тем меньше потери энергии и тем интенсивнее процесс преобразования излучения [64].

В кварцевых оптических волокнах, несмотря на достаточно высокую энергию фононов (порядка 1100 см<sup>-1</sup>), данный процесс может существенно сокращать эффективность генерации в инфракрасной области спектра.

Фосфатные лазерные стекла, легированные ионами эрбия и иттербия, были впервые предложены Снитцером (Snitzer) в 1968 [39]. Фосфатная матрица является наиболее благоприятной для передачи энергии электронного возбуждения в системе иттербий-эрбий [66]. Благодаря высокой энергии фононов матрицы порядка 1100-1200 см<sup>-1</sup>, время жизни верхнего метастабильного

состояния иона эрбия сокращается, что обеспечивает однонаправленность передачи возбуждения от иона иттербия иону эрбия (т.е. уменьшается вероятность обратной передачи энергии возбуждения), а также снижает вероятность процессов ап-конверсии [32, 67].

Исследованию спектроскопических свойств фосфатных стёкол, легированных совместно Ег и Yb посвящены многочисленные работы [68, 69]. Радиационное время жизни иона эрбия в таких стёклах может достигать 9.96 мс [69]. Даже при высоких концентрациях ионов эрбия 1.6·10<sup>20</sup> см<sup>3</sup> (время жизни 8 мс) сохраняется высокая квантовая эффективность до 80 % [69].

#### 1.1.3 Выводы к разделу

Кварцевые активные световоды, легированные ионами эрбия или системой эрбий-иттербий, к настоящему моменту изучены. Предельная концентрация ионов эрбия, не приводящая к существенному концентрационному тушению, не превышает 5·10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>. Современные технологии изготовления таких световодов обеспечивают стабильность близость высокое качество, параметров, теоретическому пределу. Поэтому характеристик изготовления К ДЛЯ высококонцентрированных оптических волокон с высокой эффективностью преобразования излучения накачки В лазерную генерацию требуется использование других стеклянных матриц.

Фосфатные стёкла из известных оксидных стёкол по совокупности параметров являются наиболее подходящим кандидатом для создания высококонцентрированных активных световодов с высокой эффективностью генерации в области 1.5 мкм. Актуальность и перспективность этого направления для волоконных лазеров подтверждается многочисленными исследованиями фосфатных световодов, легированных эрбием или системой эрбий-иттербий.

Таким образом, исследование композитных световодов с высококонцентрированной фосфатной сердцевиной в кварцевой оболочке, которому посвящена настоящая диссертационная работа, должно быть полезным для развития этого направления.

#### 1.2 Суперлюминесцентные волоконные источники излучения

Суперлюминесценция, или усиленное спонтанное излучение (УСИ, англ. ASE — «Amplified Spontaneous Emission»), наблюдается в активных средах, в которых создана инверсия населённостей уровней энергии и отсутствует резонатор, обеспечивающий обратную связь [70, 71]. В отличие от обычного спонтанного излучения, УСИ в определенной степени обладает свойством направленности; его спектр значительно уже, чем спектр спонтанного излучения; его проявление характеризуется слабо выраженным порогом; и пучок УСИ может иметь достаточную интенсивность [72].

Суперлюминесцентные волоконные источники излучения (СВИ, Superluminescence<sup>1</sup> Fiber Source) на базе эрбиевых световодов применяются в рефлектометрии [73, 74], низкокогерентной интерферометрии [75-77], волоконнооптических гироскопах (ВОГ) [3, 78-83], оптической низкокогерентной томографии [84-87] и т.п. [88]. Для данных источников характерны высокая пространственная когерентность, большая ширина спектра и высокая временная стабильность [89].

Ключевыми характеристиками СВИ являются выходная мощность, спектр излучения (ширина и форма) и их стабильность. Мощность выходного излучения СВИ напрямую влияет на интенсивность интерференционной картины, а ширина спектра определяет разрешающую способность интерференционных методов. Предпочтительной является форма спектра, приближенная к Гауссу [90], поскольку в данном случае функция интерференции излучения с самим собой от сдвига фаз (автокорреляционная функция) так же имеет форму Гаусса и наиболее легко поддается анализу [91].

#### 1.2.1 Основные конфигурации СВИ

Основными элементами СВИ являются лазерный диод накачки (ЛД), активное волокно и спектрально-селективный ответвитель (ССО). Для создания инверсии населенности в эрбиевых световодах традиционно используют лазерные

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> В англоязычной литературе часто используется термин "Superfluorescence Fiber Source" применительно к данному типу источников излучения. Однако, согласно терминологии [200], он соответствует типу излучения.

диоды накачки с длиной волны вблизи 980 нм или 1480 нм, соответствующей переходам  ${}^{4}I_{15/2} - {}^{4}I_{11/2}$  или  ${}^{4}I_{15/2} - {}^{4}I_{13/2}$ , соответственно. Накачка на длине волны 1480 нм имеет более высокую квантовую эффективность, но и более высокий коэффициент шума, в сравнении с накачкой на 980 нм [92].

Известны четыре основные конфигурации СВИ: однопроходная с попутной накачкой, однопроходная с встречной накачкой, двухпроходная с попутной накачкой и двухпроходная с встречной накачкой [71]. Основные виды схем накачки активного эрбиевого волокна схематически изображены на рисунке 4 [53, 88].



Рисунок 4 – Основные конфигурации СВИ: а - однокаскадная с попутной накачкой, б - однокаскадная с встречной накачкой, в - двухкаскадная с попутной накачкой, г - двухкаскадная с встречной накачкой (ЛД – лазерный диод; ССО – спектрально-селективный ответвитель; УСИ – усиленное спонтанное излучение; ЭС – световод, легированный ионами эрбия; наклонный конец волокна указывает на отсутствие отражений).

В двухпроходных конфигурациях (рис. 4 в, г) наблюдается более высокая эффективность преобразования излучения накачки в выходной сигнал при меньшей длине легированного эрбием волокна в сравнении с однопроходными конфигурациями [71, 93]. Более эффективное использование накачки достигается за счет установки зеркала в одно из плеч спектрально-селективного ответвителя. При этом сигнал дважды проходит через усиливающую среду, и выходная оптическая мощность СВИ существенно возрастает. Усиление при двукратном проходе составляет от 40 до 60 дБ. Однако даже незначительные отражения на концах активного волокна переводят СВИ в режим лазерной генерации [77]. В действительности лазерная генерация может возникнуть не только из-за отражений от компонентов или торцов волокон, но также обратная связь может появиться из-за Рэлеевского рассеяния [77].

В приборостроении наиболее широкое распространение получила однопроходная конфигурация с встречной накачкой (рис. 4, б) из-за того, что эта схема не склонна к переходу в режим лазерной генерации и проста в реализации [77].

#### 1.2.2 СВИ на основе кварцевых эрбиевых световодов

Традиционные эрбиевые световоды обеспечивают достаточно высокую мощность СВИ (более 10 мВт) и широкий (более 20 нм), непрерывный, стабильный во времени и в диапазоне температур спектр без линейчатой структуры продольных мод [88]. Однако ширина спектра и средняя мощность зависят друг от друга обратно пропорционально: увеличение выходной мощности СВИ приводит к сужению спектра излучения. Так, например, в работе [79] продемонстрирована ширина спектра СВИ на полувысоте 30.5 нм, но выходная мощность составила всего 1.3 мВт. Наиболее характерны для СВИ на основе кварцевых световодов, применяемых на практике, выходная мощность порядка 10 мВт и ширина спектра около 25 нм [94].

Одновременное увеличение интенсивности и ширины спектра УСИ при использовании традиционных эрбиевых световодов возможно только при существенном усложнении схемы СВИ [83, 95, 96]. К примеру, накачка активного волокна двумя лазерными диодами с разных концов световода одновременно и использование спектрально-селективного ответвителя 1530/1550 нм для выравнивания спектра позволили получить мощность УСИ 5.2 мВт при ширине

спектра на полувысоте порядка 22.9 нм и спектральной неравномерности спектра всего 0.2 дБ [78]. В работе [97], благодаря неполному насыщению активной среды, была достигнута ширина спектра на полувысоте 50 нм при дифференциальной эффективности источника 32 – 34 %. В работе [96] представлена схема гибридного СВИ, на основе флюоритового волокна, легированного ионами тулия, и кварцевого волокна, легированного эрбием. Интегральная мощность реализованного источника составляла 28 мВт, плотность мощности более -20 дБм/нм в диапазоне от 1460 до 1610 нм, однородность плотности мощности была лучше, чем 0.05 дБ/нм.

Однако, в большинстве случаев, главный недостаток таких сложных схем заключается в снижении стабильности параметров УСИ под воздействием окружающей среды.

#### 1.2.3 СВИ на основе высококонцентрированных эрбиевых световодов

Альтернативный подход к получению одновременного увеличения спектральной ширины и интенсивности УСИ заключается в изменении состава стёкол эрбиевых световодов. В данном направлении проводятся исследования как по модификации традиционных световодов за счёт дополнительного легирования кварцевой сердцевины другими ионами РЗЭ, так и по использованию новых для волоконной оптики стёкол.

Совместное легирование ионами тулия и эрбия позволяет «уширить» спектр в S-диапазон, благодаря излучению ионов тулия. Так, в работе [98] ширина излучения однопроходного СВИ на полувысоте составила более 90 нм (1460-1550 нм) при выходной мощности 10 мкВт. Авторы работы [82] сообщают о том, что на основе кварцевого световода с двойной оболочкой длиной 55 см, легированного одновременно ионами эрбия и иттербия, ширина спектра СВИ составила от 34 нм (при выходной мощности 9.1 мВт) до 80 нм (при выходной мощности 3.8 мВт). Однако помимо полезного излучения в диапазоне длин волн 1450–1650 нм от ионов  $Er^{3+}$ , наблюдалось усиленное спонтанное излучение в диапазоне 1000–1100 нм, обусловленное ионами Yb<sup>3+</sup>.

Другой подход основывается на изготовлении световодов из принципиально новых для волоконной оптики оксидных стекол [99]. Наиболее часто встречаются исследования СВИ на основе теллуритных [30, 63, 100, 101] и флюоритовых [31, 102] световодов, легированных эрбием. Форма спектров усиления теллуритных стекол, легированных ионами эрбия, ближе к идеальной форме Гаусса, а спектральный диапазон усиления шире по сравнению с кварцевыми волокнами [63, 100, 103].

Авторами работы [30] был изготовлен световод из стекла 70TeO<sub>2</sub> - 20ZnO-8La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 2Li<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в мольных долях), легированного 1 вес.% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Высокая концентрация ионов эрбия позволила реализовать СВИ при длине активного волокна всего 50 см. Ширина на полувысоте УСИ составила порядка 100 нм, что в несколько раз превышает аналогичное значение в кварцевых световодах [30]. Однако выходная мощность волоконного источника излучения не превышала 2 мВт при мощности накачки 660 мВт. Кроме того, как отмечают авторы [30], при увеличении мощности ДО максимума наблюдалось накачки появление «резонансных линий» и сужение спектра излучения, что объясняется тем, что изза большой разницы показателей преломления теллуритного и кварцевого волокна в месте их сварки возникает отражение Френеля, которое приводило к лазерной генерации [30]. Совместное легирование теллуритных световодов ионами эрбия и тулия позволяет ещё больше увеличить ширину спектра УСИ (134 нм [31], 187 нм [104]).

Однако в большинстве работ эффективность генерации теллуритных световодов оказывается низкой. Для увеличения выходной мощности источников излучения возможно применение многомодового лазерного диода для создания инверсии населенности в световодах и совместного легирования световодов системой эрбий-иттербий [63, 101, 105]. Так, например, в патенте [101] представлены СВИ на основе теллуритных световодов длиной от 10 до 100 см с накачкой в оболочку от многомодового лазерного диода мощностью 1 Вт. Выходная мощность СВИ достигала порядка 13 дБм (20 мВт), а ширина спектра от 20 до 70 нм. Однако в других работах [63, 105] эффективность источников не

превышала сообщенную ранее для теллуритных световодов, легированных только ионами эрбия [30]. Кроме того, световоды продемонстрировали УСИ в области длин волн 1000-1100 нм, характерной для иттербия (рис. 5) [105].



Рисунок 5 - Спектр усиленного спонтанного излучения Er-Yb теллуритного световода длиной 25 см [105].

В действительности, в подобных материалах с низкой энергией фононов, как теллуритные стекла, у иона эрбия относительно большое время жизни уровня <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> приводит к поддержанию процессов поглощения из возбужденного состояния, т.е. к ап-конверсии и люминесценции на зеленой линии [106]. Процессы ап-конверсии могут существенно снижать эффективность лазерной генерации в инфракрасной области спектра. Низкая энергия фононов данных стекол также является причиной возникновения интенсивного УСИ в области излучения ионов иттербия в световодах, легированных системой иттербий-эрбий.

Другой недостаток теллуритных световодов заключается в большом коэффициенте рассеяния Релея, который увеличивается по мере уменьшения температур размягчения и стеклования стёкол. Как известно, рэлеевское рассеяние возникает на микро-неоднородностях стекла, которые значительно меньше длины волны распространяющегося излучения. В стёклах с меньшими температурами «фазовых» переходов, при охлаждении образуется большее

количество неоднородных микроцентров [1]. Рассеяние Рэлея также может приводить к возникновению обратной связи в СВИ.

Фосфатные световоды менее изучены с точки зрения генерации непрерывного широкополосного излучения, хотя согласно многочисленным исследованиям в данной стеклянной матрице процессы ап-конверсии значительно проявляются только при очень высоких концентрациях ионов эрбия (более 0.75 мол.% [107]), и, следовательно, можно ожидать высокой интенсивности УСИ.

Исследованию СВИ на основе фосфатных световодов посвящено всего лишь несколько работ [101, 108, 109]. В [101] за счет накачки в оболочку фосфатных световодов длиной от 10 до 50 см получено УСИ с выходной мощностью более 13 дБм (20 мВт) и шириной спектра излучения от 20 до 45 нм.

#### 1.2.4 Выводы к разделу

Потребность в увеличении ширины спектра и спектральной плотности мощности СВИ способствует исследованию активных световодов, изготовленных из новых для волоконной оптики оксидных стёкол.

Среди оптических волокон на основе перспективных оксидных стеклянных матриц, легированных ионами редкоземельных элементов, менее изученными, с точки зрения получения широкополосного излучения, остаются фосфатные световоды.

#### 1.3 Эрбиевые волоконные усилители

Волоконные эрбиевые усилители различных конфигураций широко используются в системах волоконно-оптических линий связи [110-113], а также для увеличения мощности волоконных лазеров со специальными спектральными и временными характеристиками излучения, в частности, для усиления ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) [114].

В зависимости от применения, в качестве активной среды волоконных усилителей используются эрбиевые кварцевые световоды различной конструкции. В усилителях слабого сигнала и предусилителях, как правило,

применяются световоды, легированные ионами эрбия, с накачкой в сердцевину и относительно малой выходной мощностью насыщения (порядка 100-300 мВт [113]). Типичный коэффициент усиления, более 30 дБ [110], достигается при входном сигнале менее -20 дБм.

Для получения высокой выходной мощности усиленного сигнала (более 0.5 Вт) [115-119], а также для усиления коротких и ультракоротких импульсов [7, 120], чаще всего применяются световоды с увеличенным диаметром поля моды (LMA - Large Mode Area) и накачкой в оболочку, что позволяет снизить вклад возникновения нелинейных эффектов и увеличить выходную мощность. Как отмечалось в разделе 1.1, легирование световодов системой эрбий-иттербий более эффективно при накачке в оболочку, чем легирование только ионами эрбия. Вместе с тем, существенным недостатком кварцевых световодов, легированных системой эрбий-иттербий, является невысокая эффективность усиления (20-30%), связанная с нежелательным спонтанным излучением ионов иттербия [117, 121].

Общим для всех случаев является то, что оптимальная длина активного световода в усилителе определяется концентрацией ионов эрбия в сердцевине оптического волокна. Традиционно оптимальная длина составляет порядка 10 и более метров. Как было рассмотрено в разделе 1.1, концентрация ионов Er<sup>3+</sup> в сердцевине кварцевого световода ограничена возникновением безызлучательных процессов переноса энергии возбуждения между ионами, снижающим эффективность усиления [18].

Одним из способов снижения негативного влияния нелинейных эффектов может быть сокращение длины активной среды за счет использования волокон с большей концентрацией активных ионов. Кроме того, сокращение активной среды усилителей имеет и преимущества прикладного характера, в частности, уменьшение габаритов устройств привлекательно для линий связи.

Актуальность данного направления подтверждается многочисленными исследованиями усиления высококонцентрированных эрбиевых оптических волокон и планарных световодов [37, 106, 112, 122-125].

# 1.3.1 Усиление слабого сигнала в высококонцентрированных фосфатных световодах

Волокна из фосфатных стекол, легированные только ионами эрбия [34, 38] и системой эрбий-иттербий [39, 41, 126], успешно зарекомендовали себя в качестве усиливающей среды [35]. Можно отметить некоторые работы, в которых продемонстрированы выдающиеся результаты по усилению слабого сигнала эрбиевых фосфатных световодов [38-41]. Сообщается об удельном усилении слабого сигнала на длине волны 1535 нм от 3 дБ/см до 5.2 дБ/см в полностью фосфатных световодах в работах [38, 39, 41, 126-129].

Максимальный коэффициент усиления слабого сигнала на длине волны 1535 нм эрбиевого фосфатного усилителя был получен в работе [38]. Усиление сигнала мощностью -30 дБм составило 21 дБ при мощности накачки 244 мВт на 975 нм. В исследованной конфигурации излучение накачки вводилось в сердцевину световода, попутно излучению усиливаемого сигнала. Благодаря высокой концентрации ионов эрбия (3.5 вес.%), длина использованного активного световода в усилителе составляла всего 7.1 см, таким образом, усиление на единицу длины было 3 дБ/см [38]. Выходная мощность насыщения была около 7.7 дБм.

В нескольких работах представлены исследования волоконных усилителей на основе фосфатных световодов, легированных одновременно Er<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup> [40, 41, 126], с накачкой в сердцевину.

В работе [126] в качестве активной среды усилителей были использован фосфатный световод длиной 27 мм. Сердцевина была легирована 2.81 вес.%  $\text{Er}_2\text{O}_3$  (1.08 моль%; 2.5\*10<sup>26</sup> м<sup>-3</sup>) и 2.87 вес.% Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.09 моль.%; 2.5\*10<sup>26</sup> м<sup>-3</sup>). Усиление слабого сигнала мощностью -30 дБм на 1535 нм было 10 дБ при мощности накачки 480 мВт.

В работах [40, 41] продемонстрирована более высокая эффективность усиления. Так, в работе [41] коэффициент усиления слабого сигнала (-30 дБм) на длине волны 1535 нм был около 18 дБ при меньшей мощности накачки на 980 нм, 224 мВт, и на длине волны 1550 нм усиление было 9 дБ. Длина Er/Yb фосфатного

световода была 3.6 см. Похожие результаты получены в работе [40]. В световоде, длиной 3 см, усиление слабого сигнала было 12.6 дБ на длине волны 1535 нм и 5 дБ на длине волны 1550 нм.

Рекордные результаты по усилению в Er/Yb фосфатных волокнах продемонстрированы в работе [39]. Автор реализовал усилитель на основе одномодового в рабочем диапазоне длин волн волокна с фосфатной сердцевиной и накачкой в оболочку. Длина активной среды усилителя была 8 см. Максимальный коэффициент усиления при этом составил порядка 41 дБ для слабого сигнала мощностью -30 дБм на длине волны 1535 нм, а для сигнала мощностью 0 дБм усиление было около 15 дБ во всем С-диапазоне. Однако для получения высокого коэффициента усиления был использован многомодовый диод накачки мощностью 1 Вт.

Таким образом, в рассмотренных работах получено высокое усиление высококонцентрированных полностью фосфатных световодов при их длине активной среды на порядок меньшей, чем в случае кварцевых световодов. Однако необходимо отметить, что эффективность исследованных усилителей ниже, чем усилителей на основе кварцевых световодов, легированных эрбием. Авторы не освещают данный вопрос в своих работах.

Кроме того, во многих работах представлены не полностью волоконные схемы [38, 126], что обусловлено сложностью осуществления сварного соединения между фосфатными световодами и подводящими кварцевыми.

Для решения этой проблемы была предложена композитная структура эрбиевых световодов [43-46]. Композитный активный световод сочетает в себе высококонцентрированную фосфатную сердцевину и кварцевую оболочку и, таким образом, обладает преимуществами обоих материалов. фосфатная Высококонцентрированная сердцевина обеспечивает высокий коэффициент усиления на единицу длины, а кварцевая оболочка гарантирует высокую механическую прочность, влагостойкость и легкость сварки световода с традиционными кварцевыми.

Усиление композитного световода было получено в работе [46]. При длине активной среды 5 см и накачке мощностью 35 мВт на 1480 нм усиление на длине волны 1535 нм составило 5 дБ.

# 1.3.2 Усиление импульсного лазерного излучения в высококонцентрированных фосфатных световодах

Использование высококонцентрированных активных волоконных является одним из возможных подходов увеличения порога нелинейных эффектов, в частности, вынужденного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна [21].

Встречается несколько работ по усилению импульсного сигнала с узкой шириной спектра в высококонцентрированных фосфатных световодах [130-133]. В данных работах показано, что использование высококонцентрированных фосфатных световодов позволяет получить высокий порог возникновения вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.

В [130] продемонстрировано усиление задающего импульсного лазера с рабочей длиной волны 1538 нм и очень узкой шириной спектра (около 5 МГц) в высококонцентрированном фосфатном LMA световоде. Дo усиления длительность импульса задающего генератора была около 162 нс, а максимальная пиковая мощность около 30 Вт. Длина активного фосфатного световода в усилителе была всего 12 см. Однако, благодаря высокой концентрации ионов РЗЭ в сердцевине световода (15% Yb и 3% Er) и большому диаметру сердцевины (около 15 мкм). получено усиленные более 10 дБ без возникновения вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). После усиления энергия одиночного импульса достигала 54 мкДж, а пиковая мощность - 332 Вт. Авторы также привели теоретическую оценку пороговой пиковой мощности возникновения рассеяния Мандельштама-Бриллюэна вынужденного для исследованного световода, которая составила порядка 2.8-5.6 кВт.

В последующем, та же научная группа продемонстрировала усиление импульсного сигнала на 1530 нм и длительностью импульса 100 нс в высококонцентрированном фосфатном световоде с диаметром сердцевины 25 мкм

[131]. Была достигнута пиковая мощность 1.2 кВт спектрально-ограниченных импульсов с дифракционно-ограниченным качеством пучка.

В работе [132] после усиления в двухкаскадном усилителе из высококонцентрированных Er/Yb фосфатных световодов была получена энергия импульса 0.38 мДж и пиковая мощность 128 кВт при длительности импульса порядка нескольких наносекунд. Вынужденное рассеяние Бриллюэна является акустооптическим нелинейным эффектом из-за взаимодействия между фотонами и фононами в волокне, поэтому использование импульсов с длительностью, меньшей времени жизни фононов, является дополнительным методом для увеличения порога вынужденного рассеяния Бриллюэна [134].

Другой полезный аспект сокращения длины активной среды усилителя связан со снижением нелинейного набега фазы и уширения коротких и ультракоротких импульсов (УКИ), длительностью менее 1 пс [135]. Исследование усиления УКИ в высококонцентрированных фосфатных световодах представлено в работах [135-137].

В работе [135] авторы достигли средней мощности около 100 мВт и энергии импульса около 2 нДж при усилении импульсного сигнала суб-пикосекундной длительности в фосфатном Er/Yb световоде длиной 8 см.

Авторы работы [136] продемонстрировали экспериментальные результаты усиления фемтосекундного лазера в усилителе на основе фосфатного световода, легированного 2.38 × 10<sup>26</sup> м<sup>-3</sup> ионов эрбия, и диаметром сердцевины 25 мкм. После усиления качество пучка было близким к дифракционному пределу. Импульсы имели небольшой набег фазы, и были близки к спектральноограниченным импульсам в соответствии с параметром, равным произведению длительности импульса на ширину его спектра. При энергии импульса более 100 мкДж и длительности импульса 636 фс оцененная пиковая мощность была около 160 МВт.

За счет усиления пикосекундных импульсов в 15-см фосфатном световоде, легированным 1 вес.% Er<sup>3+</sup> и 8 вес.% Yb<sup>3+</sup>, и диаметром сердцевины 14 мкм получена средняя выходная мощность импульсного лазера около 1.425 Вт.

Частота повторения импульсов была 70 МГц, соответствующая энергии импульса и пиковая мощность 20.4 нДж и 16.6 кВт, соответственно.

### 1.4 Эрбиевые волоконные лазеры

#### 1.4.1 Непрерывные волоконные лазеры

Для ряда задач, таких как спектроскопия высокого разрешения [138], оптические датчики [139], стандарты частоты, когерентное сложение [140] и пр. требуется применение лазеров с шириной спектра излучения до 10 МГц.

В общем случае спектр генерации лазера состоит из большого количества продольных мод, заполняющих спектр усиления и спектр отражения селективных отражателей. Частотный интервал между продольными модами определяется длиной резонатора [140].

В случае использования традиционных кварцевых световодов, легированных эрбием, максимальная эффективность генерации волоконных лазеров достигается при типичной длине резонатора порядка 10 м. При такой большой длине резонатора в спектр отражения брэгговских решеток  $\Delta\lambda \sim 0.1$  нм (13 ГГц на длине волны 1.55 мкм) попадает более тысячи продольных мод. Сокращение длины активных световодов до длины (10-100 см в зависимости от конфигурации одночастотного лазера), обеспечивающей генерацию на одной продольной моде, приводит к тому, что выходная мощность таких лазеров не превышает нескольких десятков мВт [140, 141].

Мощность одночастотных лазеров может быть увеличена за счет применения высококонцентрированных эрбиевых световодов. Кроме того, сокращение длины активной среды волоконного лазера должно приводить к уменьшению ширины спектра и увеличению стабильности лазера [139]. Однако эффективность генерации кварцевых световодов со средней и высокой концентрацией ионов ограничена неустранимыми потерями, обусловленными обменом энергией между ионами.

Использование высококонцентрированных фосфатных стекол привлекательно для получения одночастотной лазерной генерации, что подтверждается современными исследованиями в этой области [24, 138, 142-144].

В работе [142] было выполнено сравнение квази-непрерывной лазерной генерации фосфатных стекол различного состава, легированных системой эрбийиттербий. В фосфатных лазерных стеклах («Strong Erbium Laser Glasses», SELG) с тем же элементным составом, что использован для сердцевины экспериментальных световодов в настоящей работе, легированных 17.3 вес.% Yb<sup>3+</sup> и 1.3 вес.% Ег<sup>3+</sup>, при толщине активной среды 1.5 мм дифференциальная эффективность достигала 21.4 % при накачке на длине волны 976 нм, пороговая мощность накачки была 200 мВт. В целом, все исследованные фосфатные стёкла дифференциальную эффективность, более 15 %, продемонстрировали И пороговую мощность накачки в диапазоне от 100 мВт до 200 мВт.

В работе [143] представлен одночастотный лазер на планарном фосфатном световоде, легированном ионами Yb<sup>3+</sup> и Er<sup>3+</sup>. Длина активной среды лазера составляла 14 мм. Лазерная генерация получена на длине волны 1534.5 нм. Дифференциальная эффективность при этом была 13.9 %, пороговая мощность накачки 135 мВт.

Исследованию волоконных лазеров на основе высококонцентрированных фосфатных световодов, легированных системой эрбий-иттербий, посвящены многочисленные работы [24, 127, 129, 144-150]. Обзор параметров волоконных лазеров представлен в таблице 1.

Из представленных исследований максимальная дифференциальная эффективность 37.6 % достигнута в многомодовом фосфатном волокне [150], тогда как в одномодовых световодах максимальная эффективность не превышала 31 % [129], а наиболее характерное значение эффективности было от 5 до 12 % [145, 147-149].

Таблица 1 - Обзор волоконных лазеров на основе высококонцентрированных световодов с фосфатной матрицей, легированной системой эрбий-иттербий.

Параметры	Концентрация	l, см	λ <sub>p</sub> ,	$\lambda_s$ , HM	Pout, BT	η, %
световода (ссылка)	РЗЭ или		НМ			
	коэффициент					
	усиления/поглоще					
	ния					
d <sub>core</sub> =7 мкм [144]		22	946	1535	0.11	~3
d <sub>core</sub> =13.5 мкм	$1.1 \times 10^{26} \mathrm{Er}^{3+} \mathrm{m}^{-3}$	5.5	976	1550	1.6	5
d <sub>clad</sub> =125 мкм [145]	8.6х10 <sup>26</sup> Yb <sup>3+</sup> м <sup>-3</sup>					
[146]	$1.1 \times 10^{26} \mathrm{Er}^{3+} \mathrm{m}^{-3}$	10	976	1535	1.9	11
	8.6х10 <sup>26</sup> Yb <sup>3+</sup> м <sup>-3</sup>					
d <sub>core</sub> =19 мкм	1 вес.% Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11	975	1535	1.5	11.5
d <sub>clad</sub> =125 мкм [24]	2 вес.% Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					
ФК*	$1.6 \times 10^{26} \mathrm{Er}^{3+} \mathrm{m}^{-3}$	3.8	976	1534	2.3	12
d <sub>core</sub> =105 мкм	8.6х10 <sup>26</sup> Yb <sup>3+</sup> м <sup>-3</sup>					
d <sub>clad</sub> =125 мкм [147]						
d <sub>core</sub> =11 мкм	1 Bec.% $Er_2O_3$	7	975	1538	0.55	12
d <sub>clad</sub> =125 мкм [148]	8 вес.% Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					
ФК*	0.6 вес.% Er <sup>3+</sup>	60	927	1534.5	1.6	21
d <sub>core</sub> =20 мкм	6 вес.% Yb <sup>3+</sup>					
d <sub>clad</sub> =350 мкм [149]						
[127]	5 дБ/см@1535 нм	-	976	1560	0.2	24.3
[129]	3 мол.% Er <sup>3+</sup>	2	976	1535	0.3	30.9
	5 мол.% Yb <sup>3+</sup>					
d <sub>core</sub> =15 мкм	0.3 дБ/см@974 нм	27.8	975	1535	4.67	37.6
250х250 мкм [150]						

\*ФК – фотонно-кристаллический световод.

Кроме того, следует отметить, что в многочисленных работах [24, 144, 149, 150] исследованы не полностью волоконные схемы лазеров из-за того, что сварное соединение кварцевых и фосфатных световодов затруднено.

Таким образом, в данной области исследований существует значительный задел. Однако эффективность преобразования излучения накачки в лазерную генерацию ниже в сравнении с кварцевыми эрбиевыми световодами. Механизмы снижения эффективности генерации в известных работах по фосфатным световодам не рассмотрены.

#### 1.4.2 Импульсные волоконные лазеры

В настоящее время одним из наиболее актуальных направлений развития волоконных лазеров являются фемтосекундные лазеры с частотой следования импульсов порядка нескольких ГГц. Они требуются для многочисленных применений, таких как генерация гребенки частот, генерация оптического сигнала произвольной формы, оптических стандартах частоты [151], калибровка астрофизических спектрографов и пр. [152, 153].

Различают активные и пассивные методы синхронизации мод. В случае активной синхронизации в резонаторе лазера используются акустооптические или электрооптические модуляторы интенсивности или фазы. Модулятор создает временные окна с периодом равным либо кратным времени обхода резонатора лазера для генерации импульсов. Методами активной синхронизации мод возможно получение высокой частоты повторения импульсов порядка несколько ГГц, однако длительность импульсов таких лазеров, как правило, составляет десятки пикосекунд и более. Поэтому на сегодняшний день подавляющие большинство лазеров ультракоротких импульсов используют именно пассивную синхронизацию мод, что позволяет получать более короткие длительности импульсов по сравнению с активным методом [154].

Пассивная синхронизация мод представляет собой оптический нелинейный процесс. Синхронизация мод осуществляется с помощью нелинейного поглотителя, при прохождении которого происходит изменение временного профиля интенсивности лазерного излучения (слабые флуктуационные пики

ослабляются сильнее). В итоге на выходе лазера наблюдается последовательность ультракоротких импульсов.

Пассивная синхронизация мод может быть достигнута либо за счет использования насыщающихся поглотителей (полупроводниковые просветляющиеся зеркала SESAM, углеродные нанотрубки, графен [155] и др.), либо за счет нелинейного вращения плоскости поляризации (НВП). К минусам использования SESAM можно отнести узкий рабочий диапазон по интенсивности, а также деградация большинства SESAM при использовании.

В лазерах [156] с синхронизацией мод излучения за счет НВП излучения поляризационное состояние пучка внутри лазерного резонатора изменяется в зависимости от интенсивности излучения при взаимодействии с материалом. В сочетании с поляризатором нелинейное вращение поляризации может быть сконфигурировано как насыщаемый поглотитель, где уменьшение оптических потерь в резонаторе с увеличением интенсивности излучения используется для стимулирования формирования выходного импульса лазера. Механизм НВП очень гибкий в том, что он имеет широкую полосу пропускания, что обеспечивает максимально короткую длительность импульса, а также он устойчив к повреждению или долговременной деградации оптических элементов. Для достижения требуемых потерь с насыщением необходимо контролировать нелинейной Обычно поляризацию света В среде. ЭТО реализуется С использованием одного или нескольких поляризаторов (волновых пластин), которые вращаются для достижения желаемого состояния поляризации, как представлено на рисунке 6.

Частота повторения импульсов традиционных волоконных лазеров с пассивной синхронизацией мод довольно низкая и составляет около десятков МГц из-за длинной активной волоконной среды в лазерном резонаторе, которая обычно составляет около нескольких метров.



Рисунок 6 – Типичная схема кольцевого волоконного лазера с НЭП (ЛД – лазерный диод; ССО – спектрально-селективный ответвитель; ЭС – эрбиевый световод; ПСД – поляризационный светоделитель) [156].

Высококонцентрированные фосфатные световоды являются перспективной активной средой для лазеров УКИ с пассивной синхронизацией мод. Сокращение усиливающей волоконной среды является привлекательным подходом для увеличения частоты следования импульсов.

Волоконные лазеры с пассивной синхронизацией мод на основе Er/Yb фосфатных световодов были продемонстрированы в нескольких статьях [25-27, 157, 158].

В работах [25-27, 157] для пассивной синхронизации мод были в резонаторе лазера использованы насыщающиеся поглотители: SESAM [27], углеродных нанотрубок [25,157] и графеновой пленки, нанесенной на один конец активного волокна [26]. Благодаря малой длине резонатора Фабри-Перо (около 1 см), частота следования импульсов достигала от 5 до 12 ГГц.

В работе [158] сообщалось о полностью волоконном фемтосекундном лазерном генераторе с пассивной синхронизацией мод за счет НВП. Высококонцентрированный Er-Yb фосфатный световод длиной 20 см был использован в качестве активной среды лазера. Хотя собственная частота резонатора была значительно ниже, чем в вышерассмотренных работах, были достигнуты частоты следования импульсов от 1.7 до 7.2 ГГц за счет

гармонической синхронизации мод. Длительность импульса в данном случае была минимальной из всех рассмотренных работ и составляла от 300 до 570 фс при самой низкой и самой высокой частоте повторения, соответственно.

#### 1.5 Выводы к главе I

Проведенный анализ научных литературных данных позволяет сделать вывод о том, что в области, которой посвящена диссертационная работа, существует значительный задел. Высококонцентрированные фосфатные световоды являются одними из наиболее перспективных активных сред для ряда волоконных источников излучения, в том числе СВИ, усилителей слабого сигнала и импульсного лазерного излучения, непрерывных и УКИ волоконных лазеров с ГГц частотой повторения импульсов для области 1.5 мкм. Вместе с тем, остается нерешенной проблема низкой технологичности полностью фосфатных световодов и трудности их сварки с подводящими кварцевыми световодами.

Коллективом авторов ИОФ РАН и НЦВО РАН были разработаны композитные световоды, сочетающие высококонцентрированную фосфатную сердцевину и кварцевую оболочку. Актуальным является исследование данного типа световодов и источников излучения на их основе.
### Глава 2. Исследование свойств композитных световодов с высококонцентрированной фосфатной сердцевиной в кварцевой оболочке

В настоящей главе представлены результаты исследования параметров экспериментальных образцов композитных световодов, легированных эрбием и системой эрбий-иттербий. В первом разделе кратко описана технология изготовления композитных световодов с высококонцентрированной фосфатной сердцевиной в кварцевой оболочке, которая была разработана коллективом авторов ИОФ РАН и НЦВО РАН [42-44, 159]. Исследование параметров эрбиевых световодов выполнено автором лично, а эрбий-иттербиевые световоды были охарактеризованы О.Н. Егоровой [44].

### 2.1 Технология изготовления композитных световодов [44, 159, 160]

Преформы оптических волокон изготавливались методом «стержень в трубке». Для сердцевины преформ было выбрано фосфатное лазерное стекло («Strong Erbium Laser Glasses», SELG: 65 мол.% Р<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 7 мол.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 12 мол.% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 9 мол.% Li<sub>2</sub>O и 7 мол.% x·Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-y·Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(7-x-y)·Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), не только имеющее спектрально-люминесцентные характеристики хорошие при высоких концентрациях ионов редкоземельных элементов [160], но и совместимое с кварцевым по физико-химическим свойствам. Исходные фосфатные стёкла изготовлены с различающимся легированием редкоземельными элементами. Время жизни метастабильного состояния ионов эрбия в исходных стеклах составляло около 7 мс. В настоящей работе исследовались световоды из фосфатных стёкол, содержащих 1 вес.% Er<sup>3+</sup>, 3 вес.% Er<sup>3+</sup> и совместно легированных 17.3 вес.% Yb<sup>3+</sup> и 1.3 вес.% Er<sup>3+</sup>. Световоды, легированные ионами эрбия, предназначались для накачки в сердцевину, а легированные системой эрбий-иттербий, - для накачки в оболочку.

Из стекол были изготовлены стержни цилиндрической формы и вставлены в кварцевые трубки. После чего полученные заготовки консолидировались при температуре около 2000°C и перетягивались на меньший диаметр. Для достижения необходимого соотношения между диаметрами сердцевины и оболочки исходная заготовка помещалась в дополнительную опорную кварцевую

трубу и сплавлялась с ней. Перед вытяжкой заготовки, легированные системой эрбий-иттербий, были отполированы до квадратного поперечного сечения для более эффективной накачки световодов из оболочки.

Наконец, заготовки вытягивались в волокна с полимерным покрытием. Все описанные операции выполнялись при тех же температурных режимах, которые обычно используются для изготовления световодов на основе кварца [159].

### 2.2 Композитные световоды, легированные ионами эрбия

Световоды, легированные только ионами эрбия, как было показано в обзоре литературы, используются в маломощных источниках излучения. Для получения высокой эффективности и стабильности источников излучения на основе эрбиевых световодов необходимо обеспечить условие распространения одной поперечной моды в диапазоне длин волн генерации. Поэтому соотношение диаметров сердцевины и внешней кварцевой оболочки исходных заготовок было рассчитано таким образом, чтобы световоды были одномодовыми в диапазоне люминесценции ионов эрбия. Однако тогда как для кварцевых световодов процесс вытяжки хорошо изучен и отклонение фактической длины волны отсечки от теоретического значения предсказуемо, смоделировать изменения профиля показателя преломления композитных световодов проблематично из-за процесса взаимной диффузии элементов многокомпонентного сложности фосфатного и кварцевого стекол.

Для того чтобы экспериментально получить световоды, одномодовые в диапазоне люминесценции ионов эрбия, в процессе вытяжки из каждой заготовки вытягивалось несколько световодов с различными диаметрами внешней кварцевой оболочки и, соответственно, диаметрами сердцевины. Диаметры внешней кварцевой оболочки световодов составляли 100, 125 и 150 мкм из заготовки с 1 вес.% Er<sup>3+</sup>; и 80, 100, 110 и 120 мкм из заготовки с 3 вес.% Er<sup>3+</sup>.

Измерение длины волны отсечки световодов методом изгиба [161] было затруднено из-за интенсивных полос поглощения ионов эрбия. Поперечный модовый состав световодов в диапазоне люминесценции ионов эрбия был исследован путем качественной оценки распределения интенсивности ближних

полей мод, возбужденных широкополосным суперлюминесцентным лазерным диодом (СЛД) в сердцевине световодов на коротком прямом участке. На рисунке 7 представлены типичные распределения интенсивностей возбужденных мод в световодах. Положение пучка на входном торце исследуемых световодов относительно центральной оси световодов. Если смещалось световод поддерживал только фундаментальную моду в диапазоне излучения СЛД (от 1480 нм до 1530 нм), распределение интенсивности оставалось неизменным независимо от положения входного пучка (рис. 7, а). В случае маломодового режима распространения излучения по световоду, при смещении пучка СЛД относительно оси исследуемых световодов наблюдалось возбуждение мод более высоких порядков (рис. 7, б и в).

Исследование модового состава сердцевины световодов показало, что световоды, содержащие 1 вес.% ионов эрбия с диаметрами оболочки 100 и 125 мкм и 3 вес.% ионов эрбия с диаметрами 80 и 100 мкм, были одномодовыми в диапазоне длин волн более 1.48 мкм.







Рисунок 7 – Фотографии поперечного распределения интенсивностей возбужденных мод в световодах, легированных 1 вес.% Er<sup>3+</sup>: а – фундаментальная мода; б – вторая мода; в – гибридная мода.

В последующих исследованиях были использованы два световода, одномодовые в диапазоне излучения ионов эрбия: 1 – световод, легированный 1 вес.% Er<sup>3+</sup>, с диаметром внешней оболочки 125 мкм (ЭС#1); 2 – световод, легированный 3 вес.% Er<sup>3+</sup>, с диаметром внешней оболочки 100 мкм (ЭС#2). Исследованы их оптические свойства, а также элементный состав сердцевины.

#### 2.2.1 Элементный состав сердцевины эрбиевых композитных световодов

Элементный состав стекла в поперечном сечении световодов был изучен с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S3400, оборудованного энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (EDX). В процессе вытяжки световодов состав существенно изменился из-за взаимной диффузии компонентов стёкол сердцевины и оболочки [44]. На рисунке 8 представлено СЭМ-изображение торца и распределение компонентов вдоль поперечного сечения сердцевины композитного световода ЭС#2. Для световода ЭС#1 состав сердцевины изменился подобным образом.



Рисунок 8 – Композитный световод, легированный 3 вес.% Er<sup>3+</sup>, с диаметром внешней оболочки 100 мкм: а- СЭМ-изображение торца световода, б - распределение компонентов стекла в поперечном сечении сердцевины (каждая кривая относится к вертикальной шкале того же цвета).

Согласно измерениям, концентрация  $P_2O_5$  в сердцевинах обоих световодов снизилась с 65 мол.% до 20 мол.%, а SiO<sub>2</sub> 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.%. Необходимо отметить, что метод рентгеновской спектрометрии не чувствителен к легким компонентам (Li и B).

Хотя концентрация  $P_2O_5$  порядка 20 мол.% может быть достигнута при помощи традиционной технологии изготовления активных заготовок методом MCVD, как недавно было продемонстрировано [23, 162], в нашем случае 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 MCVD [21]. Разбавление ионов  $Er^{3+}$  ионами  $Gd^{3+}$  должно ослабить потери, вызванные ап-конверсией, благодаря более равномерному распределению ионов  $Er^{3+}$  в стекле [163]. Таким образом, изучаемые композитные световоды имеют уникальный состав сердцевины, не исследованный ранее.

### 2.2.2 Оптические свойства эрбиевых композитных световодов

Профиль показателя преломления (ППП) световодов, измеренный с помощью S14, представлен на рисунке 9. Диаметры сердцевины на половине высоты составили 4.3 и 3.6 мкм для ЭС#1 и ЭС#2, соответственно. Измеренная абсолютная разница показателей преломления сердцевины и оболочки хорошо согласуется со значением, рассчитанным из молярных концентраций оксидов [162, 164, 165].

Разность показателей преломления ЭС#2 ( $\Delta n=0.028$ ) была выше, чем разница показателей преломления ЭС#1 ( $\Delta n=0.024$ ). Согласно расчетным оценкам, это различие вызвано значительным вкладом оксидов РЗЭ в значение показателя преломления (молярная рефрактивность  $Er_2O_3 5.4*10^{-3}$  моль<sup>-1</sup> [166]).

Длина волны отсечки  $\lambda_{cut off}$  оценивалась теоретически по формуле:

$$\lambda_{cut \, off} = \frac{\pi \cdot d_{core} \cdot NA}{V},\tag{1}$$

где *d<sub>core</sub>* – диаметр сердцевины по основанию, *NA* – числовая апертура, V – нормированная частота (V≈3.16 с учетом формы ППП [167]). Длина волны отсечки составила около 1490 нм для ЭС#1 и 1350 нм для ЭС#2.



Рисунок 9 – Профиль показателя преломления композитных световодов.

### 2.2.3 Спектры поглощения и усиления эрбиевых композитных световодов

Спектры поглощения и усиления слабого сигнала измерены методом «обрыва» [168]. На рисунке 10 представлены спектры поглощения и усиления образца ЭС#1. Полоса усиления композитных световодов от 1450 до 1625 нм. Пиковые значения поглощения и усиления представлены в таблице 2.

Затухание на длине волны 1300 нм составило около 2 дБ/м для ЭС#1 и 4.1 дБ/м для ЭС#2, что соответствует лучшему результату, достигнутому для волокон с фосфатной сердцевиной (4.1 дБ/м в [128]). Для сравнения, затухание кварцевых световодов при близких концентрациях оксида фосфора (около 15 мол.%) могут составлять от 0.1 до 0.6 дБ/м [162].



Рисунок 10 – Композитный световод, легированный 1 вес.% Ег: а - спектр поглощения, б – спектр усиления слабого сигнала.

Таблица 2 - Параметры световодов.

Параметры	ЭС#1	ЭС#2
Концентрация $\mathrm{Er}^{3+}$ в заготовке волокна, вес.% (см $^{-3}$ ) <sup>2</sup>	$1(1.02 \cdot 10^{20})$	$3(3.06\cdot10^{20})$
Пик поглощения слабого сигнала @980 нм, дБ/см	0.44	1.25
Пик поглощения слабого сигнала @1535 нм, дБ/см	1.4	3.65
Пик усиления слабого сигнала @1535 нм, дБ/см	1.6	3.1
Диаметр сердцевины, мкм	4.3	3.6
Числовая апертура NA	0.265	0.288
Длина волны отсечки, нм	1490	1350
Диаметр оболочки, мкм	125	100

Для сварки композитных световодов с кварцевыми был использован стандартный сварочный аппарат для телекоммуникационных волокон Sumitomo Electric Type-36. Оптимальные параметры режима сварки были подобраны экспериментально. Благодаря кварцевой оболочке, сварки между композитными и кварцевыми волокнами хорошо воспроизводились, как показано на рисунке 11. Потери на сварках составляли от 0.12 дБ до 1.1 дБ на длине волны 980 нм.

OPEN	HOOD
SMF028	Er³+ -doped composite fiber

Рисунок 11 - Сварное соединение композитного волокна с SMF028.

## 2.2.4 Оценка радиационного времени жизни метастабильного уровня композитных световодов, легированных эрбием

Для оптических усилителей или лазеров, работающих на 1.55 мкм, важным параметром является время жизни уровня  $\mathrm{Er}^{3+4}I_{13/2}$ : чем больше время жизни, тем

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Концентрация ионов эрбия в см<sup>-3</sup> рассчитана из вес.% в соответствии с Приложением 1.

выше населенность этого уровня и проще достичь инверсию населённости [58, 163]. В кварцевых световодах время жизни верхнего лазерного уровня <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> достигает порядка 10 мс, что делает эрбиевые световоды удобными для накачки относительно маломощными и, соответственно, дешевыми диодными лазерами, излучающими на длине волны около 980 или 1480 нм [163].

Процедура измерения времени жизни в эрбиевых световодах затруднена тем, что для получения интенсивности люминесценции, достаточной для детектирования с помощью фотодетектора, требуется большая длина активной среды. Однако при использовании длинных образцов возникают искажения кинетики затухания из-за высокой вероятности возникновения множества процессов (повторного поглощения люминесцентного сигнала, усиленного спонтанного излучения и пр.) даже при использовании методики измерения [169], согласно которой люминесцентный сигнал собирается из оболочки световода (рис.12).



Рисунок 12 – Кинетика затухания люминесценции в световоде, легированном 3 вес.% Er<sup>3+</sup>, измеренная по методике [169].

В настоящей работе предложен метод оценки радиационного времени жизни в эрбиевых световодах, основанный на предположении, что основным

механизмом потерь в исследуемых световодах при низком уровне возбуждения является процесс ап-конверсии, как было показано в работе [163].

Безызлучательные потери энергии, вызванные ап-конверсией, описываются следующим уравнением:

$$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} = -\frac{n}{\tau} - \alpha n^2 \tag{2}$$

где n - плотность возбужденных ионов на уровне  ${}^{4}I_{13/2}$ ,  $\tau$  – радиационное время жизни и  $\alpha$  - параметр нелинейного тушения люминесценции, обусловленного ап-конверсией. Значение  $\alpha$  зависит от спектроскопических свойств ионов эрбия и от их пространственного распределения в кристаллической или стеклянной матрице.

Решение этого уравнения может быть выражено следующим образом:

$$n(t) = \frac{n_0 \cdot exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}{1 + \alpha \cdot n_0 \cdot \tau \left(1 - exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)}$$
(3)

здесь  $n_0$  - начальная плотность возбужденных ионов на уровне  ${}^4I_{13/2}$ .

Мы полагаем, что процессы перепоглощения/переизлучения в исследуемом образце, определяющие затягивание наблюдаемого времени жизни люминесценции, зависят только от геометрии образца. В этом случае можно получить набор данных по высвечиванию в зависимости от  $n_0$  и построить функцию  $\tau_{изм}(n_0)$ , что позволяет вычислить реальное время жизни люминесценции  $\tau$ .

Для определения радиационного времени жизни образца проводилась серия измерений кинетики затухания при различных уровнях возбуждения. Измерительная схема представлена на рисунке 13. Измерительный стенд работал следующим образом. Генератор посылал электрический импульс на блок питания лазерного диода накачки. Импульс лазерного излучения накачки ( $\lambda_{pump} = 800$  нм [163]) по одномодовому световоду направлялся в исследуемый образец. Люминесцентный сигнал из сердцевины световода поступал на Ge фотоприёмник (время ответа 200 нс), оснащенный оптическим фильтром для подавления излучения накачки. При помощи осциллографа записывалась кинетика затухания

инфракрасной люминесценции. Интенсивность импульса накачки варьировалась от 20 до 50 % от максимальной, а длительность – от 1 до 5 мс.



Рисунок 13 - Схема измерения времени жизни люминесценции активных волоконных световодов.

Для измерения времени жизни образцы исследуемых активных световодов приваривались к одномодовому световоду доставки излучения накачки. Длина экспериментальных образцов составила 4 мм и 1 мм для ЭС#1 и ЭС#2, соответственно.

На рисунках 14 (а) и (в) представлены измеренные зависимости затухания инфракрасной люминесценции. Полученные зависимости затухания люминесценции с хорошей точностью описываются экспоненциальной функцией, как и в других работах по измерению времени жизни ионов эрбия в фосфатных стёклах [99, 170, 171]. Время жизни для каждого случая оценено по уровню *e*<sup>-1</sup>. Времена затухания люминесценции отличаются в зависимости от степени инверсии населенности.



Рисунок 14 – Кинетика затухания инфракрасной люминесценции: а, б – световод, легированный 1 вес.% (4 мм); в, г - световод, легированный 3 вес.% (1 мм).

Из зависимостей измеренной амплитуды люминесценции от измеренного времени жизни может быть оценено радиационное время жизни, как показано на рисунках 14 (б) и (г). Измеренная интенсивность излучения, A (B), пропорциональна заселенности  $n_0$  ионов  $\mathrm{Er}^{3+}$ . Для описания зависимости интенсивности люминесценции от измеренного времени жизни  $t_e$  из формулы (3) может быть получено уравнение следующего вида:

$$A = \frac{e \cdot exp\left(-\frac{t_e}{\tau}\right) - 1}{k \cdot \tau \left(1 - exp\left(-\frac{t_e}{\tau}\right)\right)} \tag{4}$$

где A – амплитуда интенсивности в начальный момент времени, пропорциональная первоначальной населенности уровня  $n_0$ ,  $t_e$  – экспериментальное время жизни, определенное по уровню  $e^{-1}$ , k – коэффициент пропорциональности, учитывающий параметр нелинейного тушения люминесценции, сечение люминесценции и к.п.д. фотоприёмника.

Экспериментальные данные, представленные точками на рисунках 14 б и г, были аппроксимированы с помощью выражения (4). Радиационное время жизни ионов эрбия составило 6.63 мс для обоих световодов, что несколько ниже, чем в исходных фосфатных стёклах и в работе (7.05 мс) [58]. Вместе с этим, как видно из рисунков 14 (б) и (г), процессы ап-конверсии выражены существенней в более высококонцентрированном световоде. Мощность насыщения материала активной сердцевины световодов на длине волны 1535 нм была оценена, как:

$$P_S = \frac{h \cdot \nu}{\sigma_{em} \cdot \tau} \cdot S \tag{5}$$

где h - постоянная Планка,  $\nu$  – частота излучения,  $\sigma_{em}$  – сечение перехода (7.0·10<sup>-25</sup> м<sup>2</sup> [35]),  $\tau$  – радиационное время жизни, S – площадь поля моды. Мощность насыщения составила порядка 350 мкВт.

### 2.3 Композитные световоды с фосфатной сердцевиной, легированной системой эрбий-иттербий [44]

Параметры данного световода приведены в соответствии с работой [44] и представлены в диссертации для полноты понимания исследованных световодов.

Из заготовки, легированной совместно 17.3 вес.%  $(1.7 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}) \text{ Yb}^{3+}$  и 1.3 вес.%  $(1.3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}) \text{ Er}^{3+}$ , были вытянуты световоды, внутренняя кварцевая оболочка которых имела квадратное поперечное сечение со сторонами 100х100 мкм и 80х80 мкм, а диаметры сердцевины - 13.5 мкм (ЭС#3) и 10.5 мкм (ЭС#4), соответственно. В процессе вытяжки наносилось силиконовое покрытие с показателем преломления меньшим, чем показатель преломления кварцевой оболочки. Данная конструкция  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  волокна позволяла осуществлять накачку во внутреннюю оболочку.

На рисунке 15 представлено изображение торца световода ЭС#3, полученное методом сканирующей электронной микроскопии. После вытяжки концентрация оксида фосфора в сердцевине снизилась до 30 моль%, концентрация оксида кремния составила 50 моль%, оксида иттербия – 4-5 моль%.

Числовая апертура сердцевины, измеренная на 633 нм, составила 0.32; относительная разность показателей преломления, вычисленная из измеренной числовой апертуры, 0.035. Таким образом, световоды были многомодовыми в области рабочего диапазона длин волн.



Рисунок 15 – СЭМ – изображение сколотого торца волокна (а) и радиальное распределение концентрации Si и P в сердцевине OB (б) [44].

Оптические потери (рис. 16) в области длин волн 1.2 – 1.3 мкм составили 2 дБ/м. Поглощение слабого сигнала из оболочки составило около 0.23 дБ/см на длине волны 971 нм. Поглощение в сердцевине на длине волны 1535 нм составило около 1.5 дБ/см. Время жизни 7.6 мс.



Рисунок 16– Спектры поглощения (а) и поглощение в оболочке (б) композитного волокна [44].

Оптимальные режимы сварки композитных световодов с кварцевыми были определены экспериментально. Потери на сварке были оценены методом передаваемой мощности и составили от 1.7 дБ до 3.7 дБ.



Рисунок 17 - Сварное соединение композитного волокна ЭС#3 (100х100 мкм) с кварцевым световодом.

### 2.4 Выводы к главе II

Выполнено исследование элементного состава и оптических свойств композитных световодов с высококонцентрированной фосфатной сердцевиной в кварцевой оболочке. Установлено, что элементный состав сердцевины вытянутых

световодов существенно отличается от состава исходного стекла из-за диффузии компонентов через границу сердцевина-оболочка. Однако, несмотря на значительное разбавление стекла сердцевины оксидом кремния, концентрация ионов редкоземельных элементов остается на порядок выше, чем в традиционных кварцевых световодах. Поглощение слабого сигнала на 1535 нм было от 1.4 до 3.65 дБ/см.

Представлена оригинальная методика определения радиационного времени жизни ионов эрбия в световодах. Время жизни в эрбиевых световодах составило 6.63 мс, а в эрбий-иттербиевых - 7.5 мс.

Кроме того, благодаря специальной конструкции световодов, сварки между композитными и кварцевыми волокнами хорошо воспроизводились при использовании стандартного сварочного аппарата для телекоммуникационных волокон. Таким образом, установлено, что исследованные световоды обладают достоинствами как фосфатных, так и кварцевых световодов, и пригодны для дальнейшего создания и исследования волоконных источников излучения.

### Глава 3. Суперлюминесцентные волоконные источники излучения

### 3.1 Требования к параметрам источников излучения для низкокогерентной интерферометрии

Хорошо известно, что для некоторых применений, таких как ВОГ (волоконно-оптические гироскопы), требуется высокая стабильность мощности и спектра излучения СВИ в широком диапазоне температур [80, 94, 172]. Кроме того, в ряде случаев [173-176], необходимо использовать неполяризованное широкополосное излучение. Однако данные требования преимущественно являются техническим аспектом и достигаются конструкционно или при помощи соответствующей математической обработки сигналов, поэтому не являются предметом настоящей работы. В данном разделе рассмотрены только требования к параметрам широкополосных источников излучения, концептуально общие для всех сфер их применения.

Во всех случаях для увеличения отношения сигнал/шум требуется высокая выходная мощность СВИ (для ВОГ более 10 мВт [77]) в одномодовом волокне.

В методах интерферометрии с использованием спектрально широкополосного (или низкокогерентного) оптического излучения формирование интерференционного сигнала происходит только при малых разностях хода волн в интерферометре. Длина когерентности, имеет определяющее значение для функциональных возможностей измерительной системы [75]. Чем меньше длина когерентности (корреляции), тем выше пространственное разрешение интерферометра.

ВОГ работает вблизи нулевой разности хода [177], поэтому в нем, с одной стороны, допустимо использование широкополосного источника излучения, а с другой - оно необходимо для достижения высокой чувствительности ВОГ. Использование СВИ позволяет [88] снизить ошибки измерения ВОГ, вызванные паразитными эффектами, такими как обратное рэлеевское рассеяние [178], перекачка поляризационных мод в оптических элементах, эффект Керра, обратные отражения на стыках оптических элементов и др. [88, 179].

Степень когерентности излучения  $\gamma(\tau)$  принято описывать автокорреляционной функцией (АКФ) поля световой волны E(t) первого порядка [86, 180]:

$$\gamma(\tau) = \int_{t} E(t)E^{*}(t+\tau)dt, \qquad (6)$$

представляющей собой зависимость видности интерференционной картины от разницы хода  $\Delta l$  в симметричном интерферометре ( $\tau = l/c$ ). АКФ может быть измерена несколькими способами [77, 91].

АКФ может быть определена и расчётным путём, путем обратного преобразования Фурье спектра источника [87, 181]:

$$\gamma(\tau) = \frac{\int_0^\infty \varphi(\nu) exp(-2\pi i \nu \tau) d\nu}{\int_0^\infty \varphi(\nu) d\nu}$$
(7)

где  $\varphi(v)$  - спектральная плотность мощности.

Для многих применений особенно важна форма и ширина центрального пика АКФ. В общем случае, форма центрального пика определяется формой огибающей спектральной плотности излучения [180]. Ширина центрального пика АКФ и есть длина когерентности. В зависимости от применения ширина пика определяется по некоторому уровню от максимальной интенсивности (для томографии по уровню -3 дБ [86], для ВОГ по уровню -10 дБ или -30 дБ [182]).

Идеальной АКФ обладает спектр гауссовой формы. Функция когерентности представляет из себя один узкий центральный пик. Однако обычно выходной спектр источников СВИ имеет спектральную структуру [77, 180]. Для спектральных линий с формой, сильно отличающейся от гауссовой, у АКФ наблюдается сложный центральный «пьедестал» [86] и другие нежелательные эффекты, например, «боковые лепестки» [77], как представлено на рисунке 18.

Форма спектра далекая от гауссовой, обуславливающая наличие «пьедестала» у центрального максимума автокорреляционной функции (АКФ), негативно сказывается на соотношении сигнал-шум [180].

В некоторых работах сообщается о получении близкой к Гауссу формы спектра излучения эрбиевых СВИ за счет оптимизации длины эрбиевых световодов [172]. Наиболее распространенным способом достижения излучения с

более широким сглаженным спектром является спектральная фильтрация. Фильтрующим элементом может быть объемная решетка [77], набор волоконных брэгговских решеток, чирпированные брэгговские решетки [183, 184] или отрезок незаполненного легированного редкоземельным волокном волокна [77]. Вместе с тем, фильтрация чаще всего снижает выходную мощность СВИ.



Рисунок 18 - Нормированная АКФ суперлюминесцентного лазерного диода (СЛД) в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах [86].

Таким образом, для всех применений востребованы СВИ с формой спектра, приближенной к Гауссу и, соответственно, функцией когерентности наиболее приближенной к идеальному случаю. Согласно [3] для ВОГ навигационного класса точности необходимы широкополосные источники излучения с мощностью не менее 10 мВт и шириной спектра на половине высоты не менее 5 нм.

#### 3.2 СВИ на основе композитных световодов

В результаты настоящем представлены исследования разделе суперлюминесцентных волоконных источников на основе экспериментальных образцов композитных световодов. Рассмотрены различные конфигурации СВИ. качестве активной среды волоконных источников B излучения изучены световоды с накачкой в сердцевину, легированные только ионами эрбия, и световоды с накачкой в оболочку, легированные системой эрбий-иттербий. На основании требований К источникам излучения для низкокогерентной СВИ интерферометрии обзора И литературы выполнен ПО анализ

экспериментальных результатов и сделаны выводы об актуальности применения композитных световодов для практических приложений.

### 3.2.1 СВИ на основе Er<sup>3+</sup> композитных световодов

### 3.2.1.1 Экспериментальные схемы СВИ

Для исследования усиленного спонтанного излучения композитных световодов были использованы две конфигурации СВИ: однопроходная схема с встречной накачкой (рис. 19, а) и двухпроходная схема с попутной накачкой (рис. 19, б). В качестве активной среды был использован композитный световод, легированный 3 вес. % Er<sup>3+</sup> (ЭС#2). Длина композитного Er<sup>3+</sup> световода в экспериментальных схемах варьировалась от 10 см до 100 см. Все остальные волоконные компоненты источников были стандартными, широко используемыми в телекоммуникациях. Для накачки композитного световода использован лазерный диод с длиной волны генерации 976 нм с одномодовым выводом и мощностью до 660 мВт. Излучение накачки вводилось в сердцевину активного световода через спектрально-селективный ответвитель (ССО).



Рисунок 19 – Экспериментальные схемы СВИ на основе композитного световода: а - однопроходная с встречной накачкой; б - двухпроходная с со-направленной накачкой (ЛД – лазерный диод, ССО – спектрально-селективный ответвитель, ЭС – эрбиевый световод, УСИ – усиленное спонтанное излучение).

однопроходном СВИ к выходу ССО приваривался В изолятор, предотвращающий распространение отраженного сигнала от выходного торца источника излучения. Свободный конец композитного световода был отполирован под углом, что исключало отражение усиленного спонтанного излучения от торца. Потери на сварке между композитным волокном. легированным ионами эрбия, и спектрально-селективным ответвителем были оценены после выполнения исследования СВИ и составили порядка 0.3 дБ.

В двухпроходной конфигурации в качестве зеркала использован делитель оптической мощности 50/50, выходные концы которого были сварены между собой. Применение такого зеркала обеспечивает коэффициент отражения, R~99 % [185]. К свободному концу активного световода приваривался волоконный пигтейл с угловой полировкой FC/APC для предотвращения отражений. В двухпроходной конфигурации потери на сварке между композитным волокном, легированным ионами эрбия, и спектрально-селективным ответвителем составили порядка 2.1 дБ. Коэффициент отражения зеркала с учетом потерь на сварке составлял порядка 40 %.

Проведены измерения спектров излучения и выходной мощности СВИ при различных длинах активной среды и мощностях накачки. Спектры излучения измерены с помощью анализатора оптического спектра с разрешением 0.1 нм.

### 3.2.1.2 Результаты исследования однопроходной схемы СВИ

На рисунке 20 представлены зависимости выходных параметров СВИ от длины активного волокна при максимальной мощности накачки. Как видно из рисунка 20 (а), при увеличении длины активного световода до порядка 45 см, выходная мощность растет до максимального значения, а при последующем увеличении длины световода остается практически неизменной.

Измерение мощности накачки, прошедшей через активный световод, позволило оценить долю поглощенной мощности накачки, как представлено на рисунке 20 (б). В активном световоде длиной около 45 см происходит полное поглощение накачки (более 99 %), что хорошо объясняет полученный вид зависимости выходной мощности от длины световода. В активном световоде,

длина которого более 45 см, имеющейся мощности накачки недостаточно для создания заселённости энергетического уровня  ${}^{4}I_{13/2}$  более 50 % по всей длине световода, поэтому усиленное спонтанное излучение, распространяющееся сонаправлено накачке, поглощается в участке активного световода, расположенном на расстоянии более 45 см от ввода накачки.

Максимальная выходная мощность УСИ составила около 30 мВт при длинах активного световода более 45 см. Дифференциальная эффективность СВИ, оценённая по линейному участку зависимости выходной мощности от введенной мощности накачки (рис. 20, а), при этом была около 8%. Для сравнения, дифференциальная эффективность той же схемы, но с использованием стандартного эрбиевого кварцевого световода, составила около 30% [186]. Вместе с тем, необходимо отметить, что за счет высокой концентрации ионов эрбия в сердцевине композитного световода, для получения высокой выходной мощности СВИ потребовался отрезок активного световода на порядок меньший в сравнении с кварцевыми эрбиевыми световодами.



Рисунок 20 – Параметры однопроходного СВИ в зависимости от длины волокна при максимальной мощности накачки: а - выходная мощность; б – доля поглощенной накачки.

Таким образом, эффективность преобразования излучения накачки в УСИ в исследованном композитном световоде в несколько раз ниже, чем в

традиционном эрбиевом световоде. Это обусловлено несколькими особенностями экспериментального образца. В световоде сильно выражены процессы апконверсии, что обусловлено высокой концентрацией ионов эрбия в сердцевине. Поэтому, несмотря на высокий коэффициент поглощения накачки в световоде, эффективность преобразования накачки в 1,5-мкм излучение остается достаточно низкой (рис. 20, б).

Спектры излучения однопроходной схемы СВИ измерены в диапазоне от 1500 нм до 1600 нм. Типичные спектры излучения УСИ представлены на вставленном графике рисунка 21 (а). Спектры излучения однокаскадной схемы со встречной накачкой имеют сложную форму с двумя пиками на длинах волн 1535 нм и 1543 нм и шириной на полувысоте порядка 2 нм и 5 нм, соответственно. Ширина спектра излучения по уровню -10 дБ составляла от 48 нм до 12 нм при выходной мощности от 16 мкВт до 30 мВт, соответственно.



a

б

Рисунок 21 - Параметры однопроходного СВИ в зависимости от мощности накачки при длине активного световода 45 см: а – выходная мощность (на вставленном графике представлены типичные спектры УСИ); б – средневзвешенная длина волны.

Для некоторых применений важным параметром СВИ является стабильность спектрального распределения плотности мощности УСИ в зависимости от мощности накачки. В случае, когда спектр имеет сложную спектральную структуру, как на рисунке 21 (а), оценить стабильность спектра можно по изменению средневзвешенной длины волны. Средневзвешенная длина волны определена, как [82, 90, 97]:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^{n} p(\lambda_i) \cdot \lambda_i}{\sum_{i=1}^{n} p(\lambda_i)} \tag{8}$$

где мощность  $p(\lambda_i)$ , измеренная на n равно разделенных участках длин волн с центральной длиной волны  $\lambda_i$ .

На рисунке 21 (б) представлена зависимость средневзвешенной длины волны от мощности накачки. На выделенном участке зависимости спектры излучения достаточно стабильны и наклон кривой составляет всего около -0.8 ppm/мВт.

Длина когерентности УСИ оценивалась по автокорреляционным функциям (рис. 22). АКФ была получена с помощью быстрого обратного Фурьепреобразования спектров излучения, согласно уравнению (7). Из-за того, что спектры УСИ имели сложную спектральную структуру, пик АКФ имеет сложную форму, что ограничивает сферы применения полученных источников СВИ. Длина когерентности, оценённая по уровню -3 дБ, составляла от 48 мкм до 131 мкм при выходной мощности СВИ от 16 мкВт до 30 мВт, соответственно. (Длина когерентности по уровню -10 дБ от 100 мкм до 740 мкм).



Рисунок 22 – Автокорреляционные функции УСИ при длине активного световода 45 см: а – линейный масштаб; б – логарифмический масштаб.

#### 3.2.1.3 Результаты исследования двухпроходной схемы СВИ

В двухпроходной конфигурации СВИ также исследованы зависимости выходной мощности и спектров излучения при различных длинах активного световода (рис. 23). В данной конфигурации излучение УСИ распространяется сонаправлено накачке, и измеренная интегральная мощность на выходе источника включает излучение СВИ и непоглощенной накачки. Для того, чтобы определить мощность УСИ, были измерены спектры излучения в диапазоне длин волн от 900 нм до 1700 нм с разрешением 1 нм, а затем оценены доли мощности, соответствующие излучению накачки и УСИ. На рисунке 23 (а) представлены зависимости выходной мощности УСИ от мощности введенной накачки.

Анализ спектров излучения позволил установить, что источник излучения работал в режиме УСИ не во всем диапазоне исследования. В данной конфигурации СВИ обнаружено возникновение лазерной генерации, как изображено на рисунке 23 (б). Лазерная генерация возникает на длинах волн 1535 нм и 1543 нм, соответствующих пикам усиленного излучения ионов эрбия в фосфатном стекле. Возникновение лазерной генерации обусловлено обратной связью, которая могла возникнуть на сварках между композитным и кварцевыми световодами, как было объяснено в разделе 1.2.1.

Эффективность преобразования мощности накачки в УСИ в двухпроходной конфигурации при длинах световода от 18 см до 29 см получена выше, чем в однопроходной (порядка 15-20%). Максимальная эффективность преобразования мощности накачки в УСИ наблюдалась при длине активного световода 18 см. Максимальная выходная мощность УСИ при данной длине композитного волокна составила 9 мВт при мощности накачки около 120 мВт, при последующем увеличении мощности накачки наблюдалась лазерная генерация, характеризующаяся появлением пика в спектре излучения (см. рис.23, в). Максимальная мощность широкополосного излучения в двухпроходной схеме

достигнута при длине активного волокна 29 см и составила около 19.5 мВт при введенной мощности накачки порядка 200 мВт.

Уменьшение эффективности при длинах световода более 18 см обусловлено тем, что мощности накачки недостаточно для создания инверсии населенности по всей длине световода, поэтому происходит поглощение распространяющегося по световоду УСИ и повторное излучение на больших длинах волн. Поэтому, как показано на рисунке 23 (в), при больших длинах световода спектр УСИ смещается в дальне-волновой диапазон излучения ионов эрбия.



Рисунок 23 – Параметры двухпроходной конфигурации СВИ: а - зависимости выходной мощности от мощности введенной накачки при различных длинах активного световода; б – зависимость выходной мощности от длины композитного световода; в - спектры излучения.

Форма спектров излучения сложным образом изменяется в зависимости от длины активного волокна и мощности накачки. При длине активного волокна 70 см преобладает пик на длине волны 1563 нм, при длинах световода от 35 см до 50 см максимальная интенсивность соответствует длине волны 1543 нм. По мере укорочения длины активного волокна наблюдается рост интенсивности пика вблизи 1535 нм, и при длинах световода 25 см и 29 см спектр излучения имеет два пика, примерно равной интенсивности. Спектры излучения СВИ при длинах световода менее 18 см включительно, имеют такую же форму, как было описано для однопроходной конфигурации СВИ.

На рисунках 24 и 25 представлены спектры излучения и соответствующие им автокорреляционные функции для источников УСИ на основе композитных световодов длиной 29 см, 45 см, 56 см и 70 см. АКФ получены методом быстрого обратного Фурье-преобразования. Необходимо отметить, что АКФ имеет сложную форму центрального пика при высоких интенсивностях УСИ для всех исследованных длин композитного световода.

Форма функции когерентности наиболее близка к идеальной, когда в спектре излучения имеется только один пик с максимальной интенсивностью. Как например, при длине световода 70 см при выходной мощности СВИ от 0.16 мВт до 0.6 мВт имеется только один интенсивный пик на длине волны около 1563 нм (рис. 24, а). Ширина пиков АКФ по уровню -3 дБ составляет около 65-70 мкм, а по уровню -10 дБ – около 200 мкм. При длинах световода от 45 см до 56 см получены спектры излучения с одним наиболее интенсивным пиком на длине волны 1543 нм и выходной мощностью УСИ от 0.9мВт до 12.5 мВт. Длина когерентности для данных спектров составляла от 50 мкм до 130 мкм по уровню - 3 дБ и от 300 мкм до 420 мкм по уровню -10 дБм.



Рисунок 24 – Спектры излучения и соответствующие им автокорреляционные функции: а – при длине световода 70 см; б – при длине световода 56 см.



Рисунок 25 – Спектры излучения и соответствующие им автокорреляционные функции: а – при длине световода 45 см; б – при длине световода 29 см.

#### 3.2.1.4 Выводы к разделу

Исследованы две конфигурации СВИ на основе композитного световода, легированного 3 вес.% ионов эрбия (ЭС#2). Широкополосное излучение высокой интенсивности получено в обеих конфигурациях.

Эффективность преобразования излучения накачки в УСИ выше в двухпроходной схеме. Однако высокая чувствительность двухпроходной конфигурации к обратным отражениям, за счет которых в схеме возникает режим лазерной генерации, существенно снижает максимальную выходную мощность широкополосного излучения.

Максимальная выходная мощность однопроходного СВИ составила около 30 мВт при мощности накачки 660 мВт (мощности введенной накачки 620 мВт) и при длине Er<sup>3+</sup> активного волокна всего 45 см, а в двухпроходной схеме максимальная выходная мощность была порядка 19.5 мВт при мощности введенной накачки 200 мВт и длине световода 29 см. Несмотря на то, что дифференциальная эффективность источников на основе экспериментальных образцов активных световодов ниже в сравнении с традиционными кварцевыми эрбиевыми световодами, выходные параметры исследованных УСИ не уступают параметрам традиционных СВИ. Следует отметить, что за счёт высокой концентрации ионов эрбия в сердцевине композитных световодов, длина активной среды, использованная в схемах, на порядок меньше, чем в случае кварцевых эрбиевых световодов.

Длина когерентности исследованных источников имеет близкие порядки и увеличивается ростом интенсивности выходного излучения УСИ. с Использование двухпроходной конфигурации не имеет преимуществ перед однопроходной конфигурацией с точки зрения длины когерентности, не смотря на большую ширину спектров излучения. Это обусловлено сложной спектральной структурой УСИ. Из-за сложной формы спектров излучения и, соответственно, функций когерентности применение полученных источников излучения ограничено.

# 3.2.2 СВИ на основе Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> композитных световодов с накачкой в оболочку

В данном разделе представлено исследование нескольких конфигураций СВИ на основе композитных световодов, легированных системой эрбий-иттербий (ЭС#3 и ЭС#4). Совместное легирование фосфатной сердцевины ионами иттербия и эрбия позволяет реализовать накачку в оболочку в полосу поглощения ионов иттербия.

В качестве источника накачки во всех экспериментальных схемах был использован лазерный диод (ЛД) с многомодовым волоконным выходом. На рисунке 26 представлены спектры излучения лазерного диода накачки. Выходная мощность ЛД достигала 7.2 Вт. Спектр лазерного диода изменялся в зависимости от тока накачки. Центральная длина волны увеличивалась от 970 нм до 977 нм в диапазоне токов накачки от 1 до 8 А. Ширина спектра на полувысоте составляла около 4 нм.



Рисунок 26 - Спектры излучения лазерного диода накачки (FCSE01-8-976-105; Focuslight).

### 3.2.2.1 Результаты исследования однопроходной схемы СВИ с попутной накачкой

Принципиальные оптические схемы исследованных конфигураций СВИ представлены на рисунке 27. В первой схеме (рис.27, а) был исследован Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>

композитный световод с диаметром сердцевины 13.5 мкм и оболочкой 100х100 мкм (ЭС#3), во второй (рис.26, б) - Ег<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> композитный световод с диаметром сердцевины 10.5 мкм и оболочкой 80х80 мкм (ЭС#4). Исследованные схемы идентичны, в обоих случаях обеспечивается однонаправленное распространение УСИ в композитном световоде, сонаправленно излучению накачки.



Рисунок 27 – Принципиальные схемы однопроходного СВИ с попутной накачкой в оболочку: а – ЭС#3, б – ЭС#4 (ЛД – лазерный диод, ТС – кварцевый световод, легированный ионами Tm<sup>3+</sup>, ЭС –композитный световод, легированный ионами Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>).

В первой конфигурации (рис.27, а) к выходу лазерного диода накачки было приварено оптическое волокно с ведущей полимерной оболочкой, сердцевина которого была легирована 4 мол.% ионов тулия. Ионы тулия не имеют полос поглощения в области длин волн ЛД накачки, но эффективно поглощают излучение в полосе люминесценции ионов эрбия в области 1.5 мкм. Поглощение слабого сигнала на длине волны 1530 нм в тулиевом световоде было около 0.76 дБ/см. Таким образом, тулиевый световод предотвращал повреждение ЛД излучением композитного световода, распространяющимся в обратном направлении, и обеспечивал однопроходный режим генерации УСИ. Потери излучения накачки в тулиевом световоде не превышали 0.3 дБ.

Во второй конфигурации (рис.27, б) для ввода излучения накачки был объединитель Волоконно-оптический использован накачки. изолятор, установленный на сигнальном волоконном выходе объединителя накачки, УСИ предотвращал отражение ОТ свободного торца И обеспечивал однопроходный режим работы источника излучения.

Для вывода излучения из световедущей жилы в обеих схемах к активному световоду приваривалось стандартное одномодовое волокно (SMF28). Одномодовый световод выполнял функцию пространственного фильтра для мод распространяющихся ПО оболочке, излучения накачки, И предотвращал возникновение обратной связи от свободного торца световода.

В процессе исследований были измерены спектры излучения и мощность СВИ при различных мощностях накачки и длинах активных световодов. При изменении длины световода требовалось повторно выполнить сварное соединение композитного световода с кварцевым с одной стороны.

При исследовании ЭС#3 в конфигурации СВИ (рис. 27, а) было проведено две серии экспериментов. В первом случае (эксперимент № 1) длина световода варьировалась от 19 см до 100 см. Условие ввода излучения накачки в активный световод было одинаковым для всех длин световода. Потери излучения накачки на сварке между композитным и тулиевым световодами составили около 2.5 дБ. Повторно выполнялось сварное соединение между композитным световодом и SMF28. Однако воспроизводимость согласования сердцевин световодов при выполнении сварного соединения оказалась низкой из-за существенного различия диаметров модовых полей. Оценка потерь на сварке не производилась.

Во второй серии экспериментов (эксперимент № 2) длина световода варьировалась от 34 см до 63 см. Повторно выполнялось сварное соединение между композитным и тулиевым световодами. Для каждой длины световода измерялась мощность введенной накачки.

На выходе СВИ была измерена общая выходная мощность излучения, включающая непоглощенное излучение накачки и излучение ионов РЗЭ. Мощность УСИ в области 1.5 мкм оценивалась, исходя из спектрального распределения общей выходной мощности.

Характерные спектры излучения СВИ в диапазоне длин волн от 950 нм до 1650 нм представлены на рисунке 28. Источник продемонстрировал излучение в области длин волн 1000-1100 нм, характерной для люминесценции ионов

иттербия, и в области 1450 – 1650 нм, характерной для люминесценции эрбия. Крайний левый пик на рисунке 27 соответствует остаточному излучению накачки.



Рисунок 28 - Спектры излучения на выходе СВИ в эксперименте № 2 при мощности накачки 3.3 Вт (введенная мощность накачки составляла 1.6 Вт для световода длиной 52 см и 2.4 Вт для световода длиной 34 см).

В СВИ выходных спектрах наблюдался только очень слабый люминесцентный сигнал от ионов иттербия, интенсивность которого была на 2 и более порядков меньше интенсивности УСИ ионов эрбия во всех экспериментах. Такая интенсивность люминесценции ионов иттербия связана с низкая эффективной передачей энергии с уровня <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> ионов сенсибилизатора Yb<sup>3+</sup> на верхний лазерный уровень <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> ионов Er<sup>3+</sup> в фосфор-силикатной матрице композитных световодов. Таким образом, исследованный композитный световод лишен основного недостатка кварцевых световодов, легированных системой эрбий-иттербий.

Типичные зависимости долей мощности выходного излучения от мощности накачки, определенные интегрированием спектрального распределения мощности в соответствующих диапазонах длин волн, представлены на рисунке 29.



Рисунок 29 - Распределение долей мощности выходного излучения в эксперименте № 1, приходящихся на ионы эрбия, иттербия, и непоглощенное излучение накачки: а – зависимость долей мощности от мощности накачки при длине активного световода 68 см; б – доли мощности при различных длинах световода и мощности накачки 650 мВт.

эксперименте № 1 доля мощности накачки сильно варьировалась В (рисунок 29, б) при изменении световода отсутствия длины из-за воспроизводимости сварного соединения между композитным световодом и SMF28. Увеличение доли мощности накачки на выходе может быть связано как с частичным вводом в сердцевину световода SMF28 мод излучения накачки из оболочки композитного световода, так и co снижением эффективности поглощения накачки с уменьшением длины световода. Вместе с тем, в эксперименте № 2 при всех исследованных длинах световода порядка 99 % мощности на выходе источника обусловлено излучением ионов эрбия при введенной мощности накачки порядка 1.5-2.5 Вт. Таким образом, световод эффективно поглощал излучение накачки при длинах более 34 см.

Выходная мощность УСИ в области 1.5 мкм, оцененная с учетом спектрального распределения общей мощности, при различных длинах световода и одинаковой мощности накачки порядка 760 мВт представлена на рисунке 30. Установить оптимальную длину активного световода в исследованной схеме СВИ

не удалось. Как видно из рисунка 30, близкие значения выходной мощности от 6 мВт до 9 мВт при одинаковой мощности накачки были получены при длинах световода от 34 см до 68 см.



Рисунок 30 – Выходная мощность СВИ при различных длинах композитного световода ЭС#3 и мощности накачки 760 мВт.

Обнаружено, что на эффективность СВИ оказывает влияние не только изменение сварного соединения между композитным световодом и SMF28 (эксперимент № 1), но и изменение сварного соединения между тулиевым и композитным световодами (эксперимент № 2). Предполагается, что в конфигурации СВИ, представленной на рисунке 27 (а), согласование сердцевины тулиевого и композитного световодов, влияет на выходные параметры СВИ из-за различной эффективности поглощения УСИ, распространяющегося в обратном направлении, противоположном излучению накачки.

На рисунке 31 представлены зависимости выходной мощности СВИ от введенной мощности накачки для различных длин световодов, при которых получена максимальная эффективность преобразования излучения накачки в УСИ. Максимальная выходная мощность составила около 35 мВт при мощности введенной накачки 2 Вт. Пороговая мощность накачки составила порядка 300±50 мВт. Максимальная дифференциальная эффективность не превышала

2.4 %. Низкая дифференциальная эффективность связана с потерями на сварке и спектроскопическими свойствами композитного световода. Как было показано в разделе 3.2.1.2, эффективность однопроходной схемы на основе световода ЭС#2, легированного только ионами эрбия, не превышала 8 %. Выходная мощность СВИ на основе световода с накачкой в оболочку по порядку близка к полученной в разделе 3.2.1.2. Вместе с тем, выходная мощность СВИ на основе ЭС#3 может быть увеличена как за счет увеличения мощности накачки, так и за счёт оптимизации сварного соединения между композитным световодом и SMF28.



Рисунок 31 – Зависимость выходной мощности источников от введенной мощности накачки.

Спектры излучения УСИ в области 1.5 мкм при различных длинах световода представлены на рисунке 32. Форма спектров излучения не отличается от спектров СВИ на основе композитного световода, легированного только ионами эрбия. Как видно из рисунка, при увеличении длины активного световода за счет повторного поглощения излучения происходит рост интенсивности пика вблизи 1543 нм. Сокращение длины активного световода приводит к сужению спектра и сдвигу средней взвешенной длины волны в сторону меньших длин волн.


Рисунок 32 –Спектры излучения СВИ (эксперимент № 1) при длине световода: а – 80 см; б – 70 см; в – 60 см; г – 25 см.

Во второй конфигурации однопроходного СВИ с попутной накачкой (рис. 27, б) был исследован композитный световод, легированный системой эрбий-иттербий, с диаметром сердцевины 10.5 мкм и оболочкой 80х80 мкм (ЭС#4). Длина композитного световода варьировалась от 11 см до 45 см. Эффективность ввода излучения накачки в ЭС#4 была ниже, чем для световода ЭС#3, из-за различия геометрических размеров кварцевых оболочек световодов. Потери излучения на сварке между объединителем накачки и композитным световодом были около 3.7 дБ. На рисунке 33 представлены наилучшие выходные характеристики СВИ. Максимальная выходная мощность 7.1 мВт получена в эксперименте со световодом длиной 36 см при мощности введенной накачки 1.37 Вт. Максимальная дифференциальная эффективность составила около 0.7 %. Спектральные характеристики СВИ на основе ЭС#4 аналогичны продемонстрированным ранее для ЭС#3.



Рисунок 33– Параметры СВИ на основе композитного световода с диаметром сердцевины 10.5 мкм и оболочкой 80х80 мкм (ЭС#4): а – выходная мощность; б - спектры на выходе при длине световода 30 см.

Таким образом, в однопроходной конфигурации СВИ с попутной накачкой были исследованы оба световода, легированные системой эрбий-иттербий. В общем получена аналогичные зависимости выходных параметров СВИ. Вместе с тем, в световоде ЭС#3 эффективность ввода накачки была выше благодаря лучшему согласованию геометрических параметров кварцевой оболочки. Поэтому в последующих схемах СВИ исследован только световод ЭС#3.

# 3.2.2. Результаты исследования однопроходной схемы СВИ с встречной накачкой

На рисунке 34 представлена исследованная экспериментальная схема однопроходного СВИ с встречной накачкой. Излучение накачки ЛД вводилось в оболочку композитного световода через объединитель накачки. Излучение из сердцевины световода, распространяющееся в обратном направлении к излучению накачки, вводилось в сердцевину световода объединителя накачки и выводилось на сигнальном выходе. Длина активного световода ЭС#3 составляла 150 см. На выходе СВИ установлен волоконный изолятор, предотвращающий

попадание отраженного сигнала от выхода источника в активную среду. Преимущество такой однопроходной схемы перед схемами, описанными в разделе 3.2.2.1, заключается в отсутствии излучения накачки на выходе источника излучения. Были измерены мощностные и спектральные характеристики СВИ при различных мощностях накачки.



Рисунок 34 – Экспериментальная схема однопроходного СВИ с встречной накачкой в оболочку.

На рисунке 35 представлена зависимость выходной мощности от мощности накачки ЛД и типичные спектральные характеристики УСИ. Максимальная выходная мощность СВИ составила порядка 100 мВт, дифференциальная эффективность по отношению к мощности накачки была около 1.3 %. Малая эффективность прежде всего связана с высокими потерями на сварке между композитным световодом и объединителем накачки. Однако, не смотря на меньшую эффективность преобразования излучения накачки в УСИ в сравнении с такой же схемой с накачкой в сердцевину (раздел 3.2.1.2), выходная мощность УСИ в три раза выше. Таким образом, использование накачки в оболочку от мощного многомодового ЛД позволяет значительно увеличить интенсивность УСИ. Форма спектров излучения такая же, как УСИ композитного световода, легированного только ионами эрбия (ЭС#2), дополнительное легирование сердцевины световода ЭС#3 ионами иттербия не повлияло на выходные спектры излучения.



Рисунок 35 –Зависимость выходной мощности однопроходного СВИ на основе 1.5 м композитного световода ЭС#3 от мощности лазерного диода накачки (На вставленном графике представлены спектры излучения).

# 3.2.2.3 Результаты исследования двухпроходной схемы СВИ с попутной накачкой

Схема, описанная в предыдущем разделе, была модифицирована, как показано на рисунке 36.



Рисунок 36 – Экспериментальные схемы СВИ: а – двухпроходная с попутной накачкой, б – кольцевая с встречной накачкой в оболочку.

В одном случае (рис. 36, а) к сигнальному волоконному выходу объединителя накачки был приварен волоконный светоделитель, служивший

зеркалом. Длина активного световода ЭС#3 составляла 1.5 м. Во втором случае реализована кольцевая схема СВИ (рис. 35, б), в которой 50 % излучения после светоделителя направлялось на выход источника, а 50 % излучения направлялось в активную среду.

характеристики УСИ Спектральные И мощностные двухпроходной конфигурации представлены на рисунке 37. При максимальной мощности накачки 7.2 Вт выходная мощность была около 32 мВт. Зависимость выходной мощности от мощности накачки имеет экспоненциальный характер. Такой вид зависимости обусловлен тем, что мощности накачки было недостаточно для инверсии населенности по всей длине световода. Этот создания факт подтверждается также из измерений спектров излучения УСИ.



Рисунок 37 – Зависимость выходной мощности двухпроходного СВИ от мощности накачки (на вставленном графике представлены спектры излучения).

Во всем исследованном диапазоне мощности накачки спектры излучения имели два интенсивных пика с центральными длинами волн около 1535 нм и 1543 нм. Аналогичные спектры были подробно проанализированы в разделе 3.2.1.3 для двухпроходного СВИ на основе ЭС#2, легированного только ионами эрбия. В спектрах излучения наблюдается периодическая структура, обусловленная интерференцией. Зависимость выходной мощности излучения от мощности накачки и типичные спектры излучения кольцевой схемы СВИ представлены на рисунке 38. Максимальная выходная мощность составила около 5 мВт при мощности накачки 1.15 Вт. Увеличение мощности накачки приводило к возникновению лазерной генерации.



Рисунок 38 - Зависимость выходной мощности кольцевого СВИ на основе 1.5 м композитного световода ЭС#3 от мощности лазерного диода накачки (на вставленном графике представлены спектры излучения).

# 3.2.2.4 Выводы к разделу

УСИ композитных Исследована генерация световодов, легированных системой эрбий-иттербий, световедущей оболочкой co В различных конфигурациях СВИ. Установлено, что дополнительное легирование фосфатной сердцевины ионами иттербия не влияет на спектральные характеристики УСИ в области 1.5 мкм. В выходном сигнале СВИ наблюдался только очень слабый люминесцентный сигнал ионов иттербия, который по интенсивности был на 2 и более порядков меньше интенсивности УСИ ионов эрбия. Таким образом, в исследованном диапазоне мощностей накачки (до 7.2 Вт) наблюдается высокая эффективность и однонаправленность передачи энергии возбуждения от ионов иттербия ионам эрбия.

Эффективность преобразования излучения накачки в УСИ не превышала 2.4 %. Малая эффективность прежде всего связана с потерями на сварке между композитным и кварцевыми световодами, оценить которые в исследованных экспериментальных схемах не удалось. Вместе с тем, показано, что за счет использования накачки в оболочку возможно получить высокую интенсивность УСИ. Максимальная выходная мощность УСИ составила 100 мВт, что в три раза больше, чем полученная в СВИ с накачкой в сердцевину. Кроме того, было показано, что композитный световод эффективно поглощает излучение накачки из оболочки при коротких длинах световода (не более 150 см) благодаря высокой концентрации ионов редкоземельных элементов.

Предложена уникальная конфигурация однопроходного СВИ с попутной накачкой, заключающаяся в использовании тулиевого световода со световедущей оболочкой для ввода излучения накачки в композитный световод и поглощения УСИ ионов эрбия, распространяющегося в обратном направлении.

#### 3.3 Выводы к главе III

УСИ исследованы Впервые параметры высококонцентрированных композитных световодов в различных конфигурациях СВИ. Благодаря кварцевой были оболочке экспериментальных световодов реализованы полностью волоконные источники излучения. Показано, что благодаря высокой концентрации ионов редкоземельных элементов в сердцевине возможно получение высокой выходной мощности СВИ (порядка 30 мВт и более) при коротких длинах активной среды, а использование композитных световодов, легированных совместно ионами эрбия и иттербия, и накачки в оболочку позволяет существенно увеличить спектральную плотность мощности УСИ без негативного вклада излучения от ионов иттербия.

# Глава 4. Эрбиевые волоконные усилители

Настоящая глава посвящена исследованию волоконных усилителей на основе композитных световодов. В первом разделе представлены экспериментальные результаты и обсуждение усиления непрерывного сигнала. Второй раздел посвящен усилению УКИ.

#### 4.1 Усиление непрерывного сигнала в композитных световодах

## 4.1.1 Волоконные усилители с накачкой в сердцевину

Для исследования усиления непрерывного сигнала в композитных световодах, легированных ионами эрбия, (ЭС#1 и ЭС#2) была использована экспериментальная схема, представленная на рисунке 39.

В волоконном усилителе излучение сигнала распространялось попутно излучению накачки. Такая конфигурация волоконного усилителя была выбрана для того, чтобы минимизировать погрешность измерения коэффициента усиления, связанную с различием потерь при повторной сварке композитных световодов с кварцевыми, необходимой при изменении длины активной среды.

В качестве источника накачки был использован лазерный диод с длиной волны 976 нм и мощностью до 640 мВт. Длина волны накачки около 980 нм была предпочтительной, поскольку обеспечивает более высокое отношение сигналшум по сравнению с 1480 нм [92], в то время как коэффициенты поглощения слабого сигнала композитных световодов на данных длинах волн имеют близкие значения.

Излучение накачки и усиливаемого сигнала вводилось в сердцевину Er<sup>3+</sup> световодов через спектрально-селективный ответвитель (ССО). Композитный световод был соединен с общим выходом ССО при помощи сварного соединения. Потери на сварке между композитными световодами и спектрально-селективным ответвителем, оцененные на длине волны накачки составляли от 0.3 до 0.8 дБ.

Для предотвращения нежелательной лазерной генерации в активном световоде на входе усилителя использовался изолятор, как показано на рисунке 39, а свободный торец активного световода был отполирован под углом.

В качестве источника сигнала был использован непрерывный волоконный лазер с  $\lambda$ =1536 нм. Мощность сигнала, поступающая в усилитель, изменялась с помощью перестраиваемого волоконно-оптического аттенюатора. Для того чтобы контролировать мощность сигнала на входе в усилитель, 10 % мощности излучения сигнала после перестраиваемого аттенюатора отводилось при помощи волоконного светоделителя на измеритель оптической мощности 1. Мощность измерялась с разрешением 1 нВт. Усиление композитных световодов было изучено для мощностей входного сигнала от -30 дБм до 7 дБм. Длина активных световодов варьировалась от 10 до 50 см при изучении  $\mathrm{Er}^{3+}$  композитного световода, легированного 3 вес.%, и от 20 до 70 см - в случае композитного световода, легированного 1 вес.%  $\mathrm{Er}^{3+}$ .

На выходе усилителя осуществлялось измерение мощности и спектров излучения при различных мощностях накачки и различных уровнях входного сигнала. Спектры излучения получены с помощью анализатора оптического спектра с разрешением 0.1 нм. Для предотвращения влияния непоглощенного излучения накачки перед измерительным оборудованием устанавливался фильтр, пропускающий излучение в ближней инфракрасной области с длинами волн более 1050 нм (Edmund Optics Inc.).

Поскольку выходной спектр включал 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:

$$G_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{out} - P_{ASE}}{P_{in}} \right)$$
(9)

где  $P_{out}$  - мощность излучения на выходе, мВт;  $P_{ASE}$  - мощность усиленного спонтанного излучения (ASE), мВт; а  $P_{in}$  - мощность входного сигнала, мВт.



Рисунок 39 – Экспериментальная схема волоконного усилителя.

Для оценки оптимальных длин активных волокон, легированных 1 вес.% и 3 вес. % Ег, проведено исследование усиления однопроходного EDFA с попутной накачкой в зависимости от длины активного волокна. На рисунке 40 показаны оцененные коэффициенты усиления для нескольких уровней мощности входного сигнала (-30, -20, -10 и 0 дБм) при мощности введенной накачки 280 $\pm$ 5 мВт. На рисунках 40 (а) и (б) представлены зависимости для композитных волокон, легированных 1 вес.% и 3 вес.% Ег<sup>3+</sup>, соответственно.

Как видно из рисунка 40 коэффициенты усиления в волокне, легированном 1 вес.% Ег, выше, чем в волокне, легированном 3 вес.% Ег, при той же введенной мощности накачки. Зависимость эффективности усиления от концентрации активных ионов связана с кооперативными эффектами. Поскольку вероятность ап-конверсии увеличивается с ростом концентрации ионов, эффективность усиления ЭС#2 ниже, чем ЭС#1. Однако потери в результате кооперативных взаимодействий в исследованных световодах не столь значительны, как в кварцевых, из-за присутствия оптически пассивных редкоземельных ионов в сердцевине волокна [163]. Высокие значения коэффициентов усиления получены при мощности накачки около 300 мВт, что составляет половину от доступной.



Рисунок 40 – Коэффициент усиления сигнала 1536 нм в зависимости от длин композитного волокна, легированного 1 вес.% (а) и 3 вес.% (б) Ег (мощность накачки на 976 нм составляла 280 ± 5 мВт).

Максимальные значения усиления были получены при длинах световодов ЭС#1 и ЭС#2 50 см и 20 см, соответственно. Однако наибольший коэффициент усиления на единицу длины был достигнут при использовании более коротких световодов (рисунок 41). Для ЭС#2 длиной 10 см коэффициент усиления на единицу длины составлял 2.7 дБ/см при мощности накачки 280±5 мВт и увеличивалось до 3.1 дБ/см при увеличении введенной мощности накачки до 540 мВт. Для ЭС#1 длиной 20 см усиление на единицу длины составляло около 1.4 дБ/см при максимальной мощности накачки. Эти значения ниже теоретически предсказанных по сечению излучения и концентрации ионов эрбия. Согласно расчету, они должны быть равны примерно 4.7±0.1 дБ/см для ЭС#2 и 1.80±0.05 дБ/см для ЭС#1. Разница между максимальным экспериментальным и теоретическим усилением на единицу длины обусловлена кооперативными процессами, а также высоким коэффициентом затухания (фоновыми потерями) в композитных световодах (от 2 до 4 дБ/м). Тем не менее, экспериментально полученный коэффициент усиления на единицу длины исследованных образцов высоким среди световодов с аналогичной композитной является самым

конструкцией и близким к значениям усиления полностью фосфатных световодов.



Рисунок 41 - Усиление в 10 см отрезке световода, легированного 3 вес.% Er<sup>3+</sup>.

Изучение коэффициента усиления и выходного спектра EDFA в зависимости от мощности накачки было выполнено для оптимальных длин активных световодов, 50 см ЭС#1 и 20 см ЭС#2. Коэффициенты усиления в зависимости от поглощенной мощности накачки представлены на рисунках 42 (а) и (б) для оптимальных длин композитных волокон, легированных 1 вес.% (ЭС#1) и 3 вес.% (ЭС#2) ионов Ег, соответственно.

Обнаружено, что, когда мощность входного сигнала увеличивается от -30 до 7 дБм, максимальное усиление сигнала медленно уменьшается от самого высокого значения 38-39 дБ до примерно 13.5 дБ для обоих EDFA. Экспериментально достигнутые максимальные коэффициенты усиления ЭС#1 и ЭС#2 для равных уровней входного сигнала почти одинаковы.

Максимальный коэффициент усиления около 38.1 дБ на длине волны 1536 нм был достигнут для входного сигнала мощностью -30 дБм и поглощенной мощности накачки около 140 мВт в случае ЭС#1. Максимальное усиление входного сигнала той же мощности составило 38.8 дБ в случае ЭС#2 при 410 мВт. максимальной поглощенной мощности накачки Коэффициенты усиления слабого продемонстрированные сигнала, С использованием

композитных волокон в схеме однопроходного волоконного усилителя, являются самыми высокими в сравнении с известными результатами исследования усиления эрбиевых полностью фосфатных световодов [38, 40]. В то же время коэффициенты усиления слабого сигнала на единицу длины для оптимальных длин волокон ниже, чем наилучший результат 3 дБ/см в [38, 39], и составляют около 1.8 дБ/см в случае 3 вес. % Ег, а в случае ЭС#1 - только 0.76 дБ/см.



Рисунок 42 - Коэффициенты усиления в зависимости от поглощенной мощности накачки для ЭС#1 длиной 50 см (а) и для ЭС#2 длиной 20 см (б).

Следует отметить, что достигнутый коэффициент усиления слабого сигнала 38.1 дБ в ЭС#1 был максимально возможным, так как использование композитных волокон более 50 см, а также увеличение мощности накачки приводили к возникновению лазерной генерации.

При усилении сигнала, мощностью не более 0 дБм, мощность накачки, при которой наблюдалось усиление в композитных световодах, составляла менее 20 мВт для ЭС#1 длиной 50 см и не превышала 50 мВт в случае ЭС#2 длиной 20 см.

Тогда достигнутые коэффициенты как усиления были примерно одинаковыми для обоих световодов, эффективность накачки по отношению к поглошенной мошности накачки значительно выше В случае волокна, вес.% Er. Лля -30 дБм 1 слабого сигнала легированного мошностью

эффективность накачки была 0.52 дБ/мВт до насыщения усиления. Максимальная эффективность накачки ЭС#2 составляла 0.21 дБм/мВт для той же мощности Эффективность накачки обоих входного сигнала. для исследованных композитных световодов ниже по сравнению с традиционными усилителями на основе кварцевых световодов (11 дБ/мВт [187]). Это обусловлено высоким затуханием в световодах (около 1 дБ в ЭС#1 длиной 50 см и 0.8 дБ в ЭС#2 длиной 20 см) и потерями на ап-конверсию. Однако полученная эффективность композитных световодов выше известных результатов для полностью фосфатных световодов. Коэффициент усиления составлял 32±1 дБ при мощности накачки 90 мВт и 150 мВт при использовании активной среды из ЭС#1 длиной 50 см и ЭС#2 длиной 20 см, соответственно. Ранее сообщалось об усилении только от 18 дБ [41] до 21 дБ [38] при мощности накачки 250 мВт на длине волны 980 нм.

На рисунке 43 представлены зависимости коэффициента усиления от выходной мощности при оптимальных длинах композитных световодов. Выходная мощность насыщения усилителей определена по уровню 3 дБ. Выходная мощность насыщения для световода ЭС#1 длиной 50 см была от 4 дБм до 15.8 дБм при мощности введенной накачки от 90 мВт до 510 мВт. Для световода ЭС#2 длиной 20 см – от 3.4 дБм до 10.7 дБм при мощности накачки от 170 мВт до 522 мВт. Для сравнения в работе [38] выходная мощность насыщения была 7.7 дБм при мощности накачки 244 мВт, а в [39] 11 дБм при мощности накачки 1 Вт и 13 дБм при мощности накачки 1.5 Вт. В работе [40] мощность насыщения была более 10 дБм при мощности накачки около 300 мВт.



Рисунок 43 – Зависимость усиления от выходной мощности при различных мощностях накачки: а – ЭС#1 длиной 50 см; б – ЭС#2 длиной 20 см.

На рисунке 44 представлены спектры на выходе волоконного усилителя на основе ЭС#1 длиной 50 см при различных мощностях входного сигнала. На рисунке 44 (а) показана эволюция выходных спектров усилителя накачки при мощности входного сигнала -30 дБм и различных мощностях накачки. Режим лазерной генерации возникал при мощности накачки более 140 мВт. Подавление усиленного спонтанного излучения превышало 20 дБ для усиления сигнала -30 дБм во всем исследуемом диапазоне мощности накачки. На рисунке 44 (б) представлены нормированные выходные спектры того же усилителя при максимальной мощности накачки для разных уровней входного сигнала. Подавление усиленного спонтанного излучения презывало 20 дБ до 57 дБ при увеличении мощность входного сигнала от -20 дБм до 7 дБм.

Уровень сигнала по отношению УСИ в случае ЭС#2 был незначительно ниже, чем для ЭС#1. Спектры излучения на выходе экспериментальной схемы для разных мощностей входного сигнала при длине композитного световода ЭС#2 20 см представлены на рисунке 45. Подавление УСИ было от 30 дБ до 50 дБ при мощности входного сигнала от -23 дБм до 7 дБм.



Рисунок 44 - Выходные спектры усилителя на основе ЭС#1 длиной 50 см при различных мощностях входного сигнала: а - для мощности входного сигнала -30 дБм при различной поглощенной мощности накачки (указана для каждого графика на рисунке); б - для разной мощности входного сигнала (указана для каждого графика на рисунке) при максимальной мощности накачки.



Рисунок 45 – Спектры излучения на выходе экспериментальной схемы при длине активного световода ЭС#2 20 см для разных мощностей входного сигнала.

Другим важным параметром усилителей является шум-фактор. На практике шум-фактор идеального усилителя составляет 3 дБ, а типичные значения составляют 5-6 дБ. Для оценки шум-фактора была использована методика, основанная на спектральных измерения сигнала до и после усилителя [188]. Шум-фактор, *NF*, найден из выражения [189]:

$$NF(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{ASE} - P_{SSE} G}{Gh \nu B_0} + \frac{1}{G} \right)$$
(10)

где  $P_{ASE}$  – полная спектральная плотность шума на длине волны сигнала, Вт/разрешение;  $P_{SSE}$  – спектральная плотность шума спонтанного излучения источника сигнала, Вт/разрешение; G – коэффициент усиления, раз;  $B_0$  – ширина полосы шума анализатора оптического спектра, Гц; v – оптическая частота сигнала, Гц; h – постоянная Планка, 6.63 · 10<sup>-34</sup> Дж · с.

Зависимости шум-фактора от мощности накачки для усилителя с оптимальной длиной световода ЭС#1, равной 50 см, представлены на рисунке 46. Значение шум-фактора при усилении слабого сигнала близко к теоретическому пределу и составляет около 3 дБ. Для непрерывного входного сигнала мощностью 5 мВт (7 дБм) шум-фактор увеличивается до 6 дБ при максимальной мощности накачки. Поскольку подавление УСИ в случае ЭС#2 длиной 20 см было аналогичным, оценка шум-фактора не проводилась. В работе [39] шум-фактор при усилении слабого сигнала был 6.1 и 5.3 дБ на длинах волн 1535 нм и 1550 нм, соответственно.



Рисунок 46 – Зависимость шум-фактора от мощности накачки усилителя с оптимальной длиной световода ЭС#1, равной 50 см.

#### 4.1.2 Волоконные усилители с накачкой в оболочку

На рисунке 47 представлена экспериментальная схема исследования усиления Er/Yb композитных световодов со световедущей оболочкой.

С помощью объединителя накачки через пассивное волокно с двойной оболочкой в световедущую оболочку активного световода вводилось излучение накачки, а в сердцевину активного волокна - излучение усиливаемого сигнала на 1550 нм. Излучение сигнала вводились в сердцевину активного световода сонаправлено излучению накачки. Для накачки использован лазерный диод с длиной волны излучения 971 нм с многомодовым выходом и с мощностью до 2.7 Вт. В качестве усиливаемого сигнала использован непрерывный лазер с центральной длиной волны около 1550 нм и полушириной не более 0.15 нм. Мощность сигнального лазера варьировалась от 0.05 мВт до 4.25 мВт. К сигнальному волоконному выходу объединителя накачки приваривался изолятор, предотвращающий распространение отраженного сигнала в направлении источника сигнала на 1.55 мкм.



Рисунок 47 – Экспериментальная схема волоконного усилителя с накачкой в оболочку.

К выходному концу композитного волокна было приварено одномодовое волокно SMF028 (NA=0.14) с косым сколом. Это позволило исключить отражения сигнала от выхода устройства, а также приводило к фильтрации мод излучения накачки, распространяющихся по внутренней оболочке световода. Излучение накачки на выходе волоконного устройства, как и в работе [159], было меньше уровня исследуемого сигнала более чем на 30 дБ, поэтому при оценке характеристик волоконного усилителя не учитывалось. Кроме того, применение волокна SMF028 на выходе экспериментальной установки позволило получить одномодовое выходное излучение, несмотря на использование многомодового активного волокна.

Сварки между композитными и кварцевыми волокнами выполнены при помощи сварочного аппарата Sumitomo Electric Type-36, предназначенного для стандартных кварцевых световодов. При подборе наиболее оптимального режима сварки сварочный аппарат обеспечивал потери от 1.7 дБ до 3.7 дБ, что близко к результатам, представленным в работе [43] (потери около 3 дБ). Потери на сварках оценивались методом обрыва по прошедшей мощности с длиной волны излучения 1550 нм и мощностью до 70 мВт.

Измерение выходных параметров усилителя, спектров излучения и мощности, проводилось после одномодового волокна SMF028 при различных мощностях накачки и различных уровнях входного сигнала. Спектры излучения получены с помощью анализатора оптического спектра с разрешением 0.1 нм.

В экспериментальной схеме были исследованы активные световоды ЭС#3 (100х100 мкм) и ЭС#4 (80х80 мкм) длинами от 10 см до 50 см. При изменении длины волокна требовалось повторно сваривать композитный и кварцевый световоды. Однако качество сварок не воспроизводилось на стандартном сварочном аппарате. Потери на сварках на рабочей длине волны 1550 нм варьировались от 1.7 дБ до 3.7 дБ. Поэтому количественного сравнения результатов экспериментов для разных длин активных волокон и оптимизации длины композитного световода произвести не удалось.

В качестве примера на рисунке 48 представлены зависимости общей выходной мощности усилителя на основе композитного волокна 80х80 мкм длинами 36, 43 и 45 см от мощности накачки при введенном сигнале 1 мВт. Максимальная выходная мощность зафиксирована при длине композитного волокна 36 см.

Как видно из рисунка 48, зависимость выходной мощности от мощности совокупностью накачки имеет немонотонный характер, что связано С накладывающихся физических эффектов: при введении усиливаемого слабого сигнала на рабочей длине волны в многомодовое композитное волокно происходит образование нескольких поперечных мод, коэффициенты усиления для которых в активной среде различаются. Затем, при вводе усиленного излучения композитного волокна В одномодовое ИЗ выходное волокно, коэффициенты передачи для различных поперечных мод также отличаются.



Рисунок 48 - Зависимость общей выходной мощности от мощности накачки для разных длин световода ЭС#4.

Наилучшие результаты были получены для световода ЭС#3 длиной 23 см с внутренней кварцевой оболочкой 100х100 мкм и для световода ЭС#4 длиной 36 см с внутренней кварцевой оболочкой 80х80 мкм.

В усилителе на основе композитного волокна 80х80 мкм длиной 36 см проведены измерения полной выходной мощности и спектрального состава излучения. Выходной спектр включал помимо усиленного сигнала спонтанное излучение в области люминесценции ионов эрбия от 1525 нм до 1575 нм, которое вносил вклад в общую выходную мощность усилителя. Необходимо отметить, что, несмотря на совместное легирование композитных световодов ионами

иттербия и эрбия, паразитная генерация Yb в области 1 мкм отсутствует (как и при исследовании CBИ), что связано с составом стекла сердцевины оптического волокна. Согласно [24, 67, 166] фосфатное стекло обладает высокой энергией фононов за счет присутствия связей P = O, что приводит к быстрому уменьшению населенности уровня эрбия  ${}^{4}I_{11/2}$  и ограничивает обратный перенос энергии от иона эрбия к иону иттербия [24, 166].

Таким образом, для определения коэффициента усиления сигнала на 1550 нм по выходным спектрам оценивались доли мощностей, соответствующие усиливаемому сигналу и усиленному спонтанному излучению в области 1.5 мкм. Коэффициент усиления оценивался по той же формуле, что и в предыдущем разделе.

На рисунке 49 представлены зависимости коэффициента усиления от мощности накачки (рис. 49, а) и спектры излучения (рис. 49, б) на выходе экспериментальной установки при разных уровнях задающего сигнала на 1550 нм.

Максимальное значение коэффициента усиления полностью волоконного усилителя с композитным волокном 80х80 мкм составило около 13.5 дБ для входного сигнала на 1550 нм мощностью 0.37 мВт и около 9 дБ для сигнала мощность 2 мВт. Для сравнения, в работе [41] максимальное усиление на длине волны 1550 нм в фосфатном световоде с накачкой в сердцевину составляло 5 дБ для усиливаемого сигнала 1 мкВт. Таким образом, мощная накачка в оболочку, продемонстрированная в настоящей работе, позволила существенно повысить коэффициент усиления. При малых мощностях сигнала наблюдалось существенное увеличение мощности спонтанного излучения. Как видно из рисунка 49 (б) подавление усиленного спонтанного излучения в области 1550 нм составляло около 26-29 дБ.



Рисунок 49 - Зависимость коэффициента усиления от введенной мощности накачки (композитный световод 80х80 мкм, длина световода 36 см) для различных мощностей сигнала (а), спектры излучения при мощности накачки лазерного диода 2.5 Вт (б).

Однако известно, что в традиционных кварцевых световодах коэффициент усиления слабого сигнала достигает 30 дБ, а разница между уровнями усиленного спонтанного излучения и сигнала составляет более 30 дБ. Меньшее усиление и меньший контраст между уровнями сигнала и усиленного спонтанного излучения, полученные в композитном световоде с накачкой по оболочке, могут быть обусловлены следующими факторами: потерями на сварках между композитным и кварцевыми волокнами (от 1.7 дБ до 3.7 дБ), а также существенным вкладом мод высших порядков как усиленного спонтанного излучения, так и части усиливаемого сигнала. В то же время, удельное усиление в данной схеме составило 0.4 дБ/см тогда, как в кварцевых волокнах данное значение составляет порядка 0.01 - 0.03 дБ/см. Для усилителя на основе композитного волокна с внутренней кварцевой оболочкой сечением 100х100 мкм наилучшие результаты были получены при использовании отрезка волокна длиной 23 см. На рисунке 50 представлены зависимость коэффициента усиления от мощности накачки для разных мощностей усиливаемого сигнала на 1550 нм. Максимальное усиление порядка 11.5 дБ получено при мощности сигнала 0.5 мВт, удельное усиление составило около 0.5 дБ/см.



Рисунок 50 - Зависимость коэффициента усиления от введенной мощности накачки (композитное волокно 100х100 мкм, длина световода 23 см).

Однако при малых мощностях сигнала, аналогично результатам исследования световода 80х80 мкм, наблюдается существенное увеличение мощности спонтанного излучения. На рисунке 51 представлены спектры выходного излучения при различных мощностях усиливаемого слабого сигнала. Уровень усиленного спонтанного излучения ниже усиливаемого сигнала в области 1550 нм примерно на 30 дБ при мощности сигнала 0.5 мВт и на 40 дБ при мощности входного сигнала 4.25 мВт.



Рисунок 51 – Спектры излучения на выходе экспериментальной установки (рис.1) (композитное волокно 100х100 мкм, длина световода 23 см) при введенном сигнале 1550 нм и мощности накачки 2.5 Вт.

## 4.1.3 Выводы к разделу

В данном разделе представлено исследование усиления непрерывного сигнала в композитных световодах. Благодаря уникальному составу сердцевины, усилителях накачкой В сердцевину получены В с высокие удельные коэффициенты усиления слабого сигнала - 1.4 дБ/см (1 вес.%) и 3.1 дБ/см (3 Bec.%) 1536 нм. Эти значения ниже теоретически на длине волны предсказанных (4.7±0.1 дБ/см для 3 вес.% и 1.80±0.05 дБ/см для 1 вес.%), что обусловлено кооперативными процессами. Тем не менее, экспериментально полученный коэффициент усиления 3.1 дБ/см в световоде, легированном 3 вес.% ионов эрбия. является самым высоким среди волокон с аналогичной конструкцией и близким к значениям усиления полностью фосфатных световодов (от 3 до 5.2 дБ/см).

Достигнутые коэффициенты усиления слабого сигнала 1536 нм оптимизированных однопроходных EDFA около 38-39 дБ выше, чем сообщалось

во всех предыдущих работах, посвященных Er- фосфатным волоконным усилителям с той же конфигурацией.

В световодах с накачкой по оболочке максимальное значение коэффициента усиления 13.5 дБ получено в композитном световоде 80х80 мкм, длиной 36 см при мощности входного сигнала на 1550 нм 0.37 мВт. В композитном световоде 100х100 мкм, длиной 23 см максимальное усиление было около 11.5 дБ при мощности сигнала 0.5 мВт. Продемонстрированные значения усиления меньше по сравнению с эрбиевыми кварцевыми волокнами, что в первую очередь обусловлено большими потерями на сварках между композитными и кварцевыми волокнами (от 1.7 дБ до 3.7 дБ). Несмотря на это, удельное усиление в данной схеме составило 0.4-0.5 дБ/см тогда, как в кварцевых волокнах данное значение составляет порядка 0.01 - 0.03 дБ/см.

Таким образом, использование сердцевины из фосфатного стекла, содержащего высокую концентрацию ионов эрбия, позволило значительно сократить длину активной среды по сравнению с длинами, характерными для аналогичных схем на основе кварцевых волокон.

# 4.2 Исследование усиления импульсного излучения в одномодовых композитных световодах

## 4.2.1 Параметры схемы эксперимента

Исследование усиления УКИ выполнено для экспериментальной схемы волоконного усилителя, описанного в разделе 4.1.1 (Рис.39). В качестве активной среды усилителя был использован одномодовый композитный световод с накачкой в сердцевину ЭС#1. Длина световода в усилителе была 20 см.

В качестве задающего генератора был использован импульсный лазер с синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации. Лазер был создан и исследован в лаборатории активных сред твердотельных лазеров (НЦЛМТ ИОФ РАН) [190]. Собственная частота резонатора составляла 83.3 МГц. Трехкратное увеличение частоты до 250 МГц получено за счет гармонической синхронизации мод [190]. Параметры режимов

генерации задающего лазера представлены в таблице 3. Центральная длина волны была около 1540.4±0.5 нм.

N⁰	Частота следования	Длительность	Пиковая	Энергия	Средняя
	импульсов, МГц	импульса, фс	мощность, Вт	импульса, нДж	мощность, мВт
1	83.3	486	103	0.05	4.2
2	250	615	38	0.02	5.8

Таблица 3 - Параметры задающего генератора.

На выходе усилителя проводилось измерение длительности импульсов, частоты следования импульсов, средней мощности и спектров излучения. Выходные спектры были измерены на анализаторе оптического спектра (HP 70004A) со спектральным разрешением 0.1 нм. Частота следования имульсов определялась на высокоскоростном осциллографе (500 MHz, Tektronix MDO3052). Длительность импульсов измерена на оптическом автокорреляторе (AA-30DD, Avesta).

Для доставки излучения от усилителя к автокоррелятору требовалось использовать волоконный изолятор. Общая длина изолятора, включая волоконные пигтейлы из SMF28, была 1.86 м. Как известно, при прохождении коротких лазерных импульсов через среды с квадратичной дисперсией, происходит изменение длительности импульса и спектров. Поэтому перед исследованием усиления УКИ в композитных световодах была выполнена оценка влияния волоконного изолятора, а также пассивных компонентов усилителя на характеристики УКИ (Приложение 2). Было установлено, что дисперсия групповой задержки (GDD) пассивной части усилителя (изолятора и ССО) составляет около  $0.053 \text{ пc}^2$ , а изолятора на выходе  $0.062 \text{ пc}^2$ .

Для параметров задающего генератора, представленных в таблице 3, дисперсионная длина в случае использования для доставки излучения стандартного световода SMF28 не превышает 9.96 м, а нелинейная длина не превышает 5 м. Поэтому влиянием изолятора на результаты измерение длительности импульсов можно пренебречь.

# 4.2.2 Результаты и обсуждение

Исследовано усиление УКИ для различных мощностей задающего генератора от 0.01 до 4.9 мВт. Для этого задающий сигнал ослаблялся с помощью перестраиваемого аттенюатора. На рисунке 52 представлены зависимости коэффициентов усиления и средней мощности на выходе от мощности накачки усилителя. Коэффициенты усиления импульсного сигнала приблизительно на 2 дБ ниже усиления непрерывного сигнала той же средней мощности.



Рисунок 52 – Коэффициент усиления (а) и средняя выходная мощность (б) усиленного сигнала

Спектры излучения на выходе усилителя существенно отличались для различных мощностей входного сигнала. На рисунке 53 представлены выходные спектры усиленного УКИ при мощности входного сигнала 0.01 мВт, 1.4 мВт и 4.9 мВт. Как видно из рисунка, чем ниже мощность УКИ до усиления, тем сильнее прослеживается увеличение плотности мощности спектра на частотах, соответствующих максимуму усиления ионов эрбия в фосфатных волокнах (на 1535 нм). Возможно, такая форма спектров обусловлена возникновением непрерывного УСИ. Однако оценить вклад непрерывного сигнала в общую выходную мощность не удалось, поскольку пиковая мощность на 3 и более порядков выше средней мощности и при измерении амплитудно-частотных характеристик на осциллографе непрерывный фон находится на уровне шумов. Кроме того, исследование выходных спектров позволило обнаружить генерацию новых спектральных частот при усилении УКИ (рис. 53 б, в). Форма спектра может измениться только вследствие нелинейных процессов [134]. Следовательно, появление новых спектральных частот связано с достижением пороговой интенсивности возникновения нелинейных эффектов.



Рисунок 53 - Спектры излучения при различных мощностях входного сигнала: a – 0.01 мВт (P<sub>p</sub>=0.01 пДж, E<sub>p</sub> = 0.03 Вт); б – 1.4 мВт (P<sub>p</sub>=17 пДж, E<sub>p</sub> = 36 Вт); в - 4.9 мВт(P<sub>p</sub>=60 пДж, E<sub>p</sub> = 110 Вт).

Для определения интенсивности, при которой возникают нелинейные эффекты, были измерены длительности импульсов и спектры излучения и рассчитана пиковая мощность при различной мощности накачки активного световода для режимов генерации, представленных в Таблице 3.

На рисунке 54 представлена длительность УКИ после усиления и рассчитанная пиковая мощность импульсов в зависимости от мощности накачки усилителя. Для обоих режимов генерации УКИ лазера наблюдается уменьшение длительности импульсов с увеличением мощности накачки. 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. 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.





На рисунке 55 представлена динамика изменения спектров излучения усиленного УКИ при увеличении мощности накачки усилителя. 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 6.5x10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup>.

Несложный расчёт позволяет оценить параметр нелинейности у. Согласно [134] минимальная мощность излучения  $P_0$ , необходимая для проявления нелинейных эффектов, включая эффект фазовой самомодуляции и генерацию солитонных импульсов, описывается выражением  $P_0=1/\gamma L$ . Здесь L – длина световода, у – параметр нелинейности, связанный с нелинейным показателем преломления  $n_2$ . Таким образом, параметр γ композитного световода, легированного 1 вес.% ионов эрбия, равен 41 Вт<sup>-1</sup>км<sup>-1</sup>, что соответствует нелинейному показателю преломления 1.43х10<sup>-19</sup> м<sup>2</sup>/Вт. Для одномодовых кварцевых световодов значение параметра нелинейности составляет порядка 1 Вт<sup>-1</sup>км<sup>-1</sup> [191], а для кварцевых световодов, легированных ионами эрбия, -5-9.3 Вт<sup>-1</sup>км<sup>-1</sup> [192]. Таким образом, параметр нелинейности исследованного композитного световода на порядок выше по сравнению с кварцевыми световодами.



Рисунок 55 - Динамика спектров усиленного излучения: 83.3 МГц (а), 250 МГц (б).

Ширина спектра для обоих режимов уменьшается по мере увеличения усиления. Для режима № 1 ширина спектра по уровню -10 дБ изменилась от 14.3 нм до 11.2 нм, для режима № 2 - от 13.7 до 12.5 нм. При максимальных мощностях накачки хорошо прослеживается увеличение плотности мощности спектра на частотах, соответствующих максимуму усиления ионов эрбия в фосфатных волокнах (на 1535 нм).

Для более полного понимания механизмов сжатия импульса при усилении выполнен анализ автокорреляционных функций импульсов и параметра ТВР (произведение длительности импульса на ширину спектра на половине высоты).

На рисунке 56 представлены автокорреляционные функции (АКФ) импульсов одинаковой длительности до и после усиления. Из анализа АКФ можно сделать вывод о том, что импульс до усиления имел частотную модуляцию, а после усиления также имеется частотная модуляция и, наиболее вероятно, произошло изменение формы импульса.



Рисунок 56 - АКФ импульсов до и после усиления (488±10 фс, 83.3 МГц).

По измерениям длительности импульсов и ширины спектров вычислен параметр ТВР. В идеальном случае, когда отсутствует фазовая модуляция импульса, длительность импульса и ширина спектра связаны соотношением:

$$\Delta t_{st} \cdot \Delta \nu_{st} = TBP \tag{11}$$

 $\Delta v_{st}$  - FWHM ширина спектра интенсивности, Гц;  $\Delta t_{st}$  - FWHM длительность импульса, с. Параметр ТВР зависит от типа функции, описывающей огибающую лазерного импульса. При возникновении фазовой модуляции данное произведение растет, а ширина спектра значительно увеличивается.

Если принять, что импульс имеет форму гиперболического секанса, то спектрально-ограниченному импульсу должно соответствовать произведение ширины спектра на длительность импульса 0.315 [193]. Когда импульс имеет фазовую модуляцию, данное значение увеличивается [194].

На рисунке 57 представлены зависимости данного параметра от мощности накачки. Как видно из рисунка, значение параметра ТВР в исследованном диапазоне мощностей накачки линейно уменьшается с увеличением мощности накачки, что соответствует уменьшению фазовой модуляции импульса и приближению его к спектрально-ограниченному. Как было показано ранее,

нелинейный эффекты возникают при достижении некоторой пороговой Таким образом, наиболее интенсивности импульса. вероятные механизмы изменения длительности импульсов обусловлены дисперсией активного световода и кинетикой процессов поглощения и вынужденного излучения ионов эрбия до достижения порога нелинейных эффектов, а при превышении данного порога – дополнительный вклад вносит фазовая самомодуляция. Однако детальное обсуждение вклада каждого эффекта можно будет провести только по результатам численного моделирования, а также – по результатам измерения частотной модуляции импульсов.



Рисунок 57 – Зависимость параметра ТВР от мощности накачки.

Экспериментально получено сжатие УКИ при усилении. Полученные зависимости позволяют сделать вывод о том, что возможно управлять дисперсией активных световодов через инверсию населенности, и, таким образом, активные световоды могут быть использованы для управления длительностью УКИ. Оценена интенсивность возникновения нелинейных эффектов в композитном световоде, легированным 1 вес.% ионов эрбия.

### 4.3 Исследование изменения фазовой модуляции УКИ при усилении

В данном эксперименте был использован волоконный усилитель, описанный в разделе 4.1.1 (Рис.39). В качестве активной среды усилителя был использован одномодовый композитный световод с накачкой в сердцевину 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. Частота следования импульсов составляла 3.8 МГц. Пиковая мощность до усиления составляла 0.73 кВт, а энергия импульса 1.2 нДж.

При исследовании изменения фазовой модуляции УКИ при усилении был использован метод частотно-разрешённого оптического стробирования (FROG). Нелинейно-оптические методы типа FROG обеспечивают полное описание комплексного поля излучения, включая временную огибающую амплитуды и фазу с фемтосекундным разрешением [195]. Измерения параметров импульсов выполнены на приборе HR150 FROG Optical Pulse Analyzer (Coherent Solutions) в Ульяновском Государственном Университете. Усиленное излучение доставлялось к измерительному оборудованию через волоконно-оптический ответвитель из стандартного световода SMF28, длина которого составляла около 3 м.

На рисунке 58 представлены параметры импульсного излучения до усиления. Как видно из рисунка 58 (б), исходное излучение близко спектральноорганиченному импульсу, параметр ТВР составил около 0.37. Наблюдается малая отрицательная частотная модуляция (порядка -100 ГГц/пс): высокочастотные спектральные компоненты на фронте импульса, а низкочастотные запаздывают.



Рисунок 58 – Параметры импульсного лазера до усиления: a – FROG-спектрограмма; б – автокорреляционная функция интенсивности и частотная модуляция.

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. На 59 рисунке представлены автокорреляционные спектры при различных мощностях накачки. Как видно из рисунка 59, при усилении УКИ в композитном световоде во всем диапазоне мощностей наблюдается 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.



Рисунок 59 – FROG-спектрограммы импульсного излучения в зависимости от задержки при различной мощности накачки усилителя: а – 70 мВт; б – 120 мВт; в- 220 мВт; г – 330 мВт.

Из FROG-спектрограмм программное обеспечение измерительного прибора оценивает длительность импульса, ширину спектра на половине высоты и параметр TBP. Зависимости данных параметров от мощности накачки усилителя представлены на рисунке 60. При мощности накачки усилителя до 70 мВт наблюдается сильное увеличение ширины спектра от 1.9 нм до 10.5 нм и незначительное сокращение длительности импульсов от 1.59 пс до 1.07 пс. Параметр TBP увеличился существенно, от 0.37 до 1.4, что свидетельствует об увеличении частотной модуляции импульса. Последующее увеличение мощности накачки вплоть до 220 мВт сопровождается уменьшением длительности импульса и ширины спектра. Параметр ТВР также приближается к значению, соответствующему спектрально-ограниченному импульсу. При мощности накачки более 220 мВт происходит распад импульса.



Рисунок 60 – Параметры усиленного сигнала: а – ширина спектра на половине высоты, длительность импульса; б – ТВР.

По результатам измерения средней мощности усиленного импульсного сигнала были оценены коэффициент усиления, энергия импульса и пиковая мощность. На рисунке 61 представлены зависимости данных параметров усиленного сигнала от мощности накачки усилителя. Максимальная пиковая мощность сжатого импульса достигла порядка 28 кВт.



Рисунок 61 – Зависимости мощностных характеристик усиленного импульсного сигнала от мощности накачки усилителя: а – средняя мощность и коэффициент усиления, б - пиковая мощность и энергия импульса.
Как отмечалось ранее, метод FROG позволяет измерить частотную модуляцию импульса. На рисунке 62 представлены автокорреляционные функции и частотная модуляция импульса после усилителя при различных мощностях накачки. Как можно видеть, во всех случаях получена линейная отрицательная частотная модуляция.



Рисунок 62 – Автокорреляционные функции и частотная модуляция импульса при различных мощностях накачки: а – 70 мВт; б – 120 мВт; в- 220 мВт; г – 330 мВт.



Рисунок 63 – Зависимость частотной модуляции импульса от мощности накачки.

Анализ экспериментальных данных показывает, что на динамику изменения параметров усиленного сигнала существенное влияние оказал одномодовый световод доставки. При мощности накачки менее 120 мВт происходит распад импульса, обусловленный тем, что нелинейная длина одномодового световода меньше дисперсионной. Поэтому распад импульса связан с отсутствием компенсации фазовой самомодуляции. При последующем увеличении мощности накачки длительность импульсов начинает сокращаться, а пиковая мощность растет, что приводит к уменьшению дисперсионной и нелинейной длины. При максимальной пиковой мощности 28 кВт и длительности импульсов 270 фс, нелинейная и дисперсионные длины составляют около 0.02 м и 3.2 м, соответственно. В диапазоне мощностей накачки от 120 мВт до 220 мВт ФКС выполняется условие частичной компенсации за счет дисперсии одномодового световода.

Таким образом, 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.

## 4.4 Выводы к главе IV

Были созданы и исследованы полностью волоконные компактные усилители сигнала на основе композитных волокон с высококонцентрированной фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой. Использование сердцевины из фосфатного стекла, содержащего высокую концентрацию ионов эрбия, позволило значительно сократить длину активной среды по сравнению с длинами, характерными для аналогичных схем на основе кварцевых волокон. Коэффициенты усиления слабого сигнала составили 1.4 дБ/см (1 вес.%) и 3.1 дБ/см (3 вес.%) на длине волны 1536 нм. Эти значения ниже теоретически предсказанных (4.7±0.1 дБ/см для 3 вес.% и 1.80±0.05 дБ/см для 1 вес.%), что обусловлено кооперативными процессами. Тем не менее, экспериментально полученный коэффициент усиления 3.1 дБ/см в световоде, легированном 3 вес.% ионов эрбия, является самым высоким среди волокон с аналогичной конструкцией и близким к значениям усиления полностью фосфатных световодов (от 3 до 5 дБ/см).

Достигнутые коэффициенты усиления слабого сигнала 1536 нм оптимизированных однопроходных EDFA около 38-39 дБ выше, чем сообщалось во всех предыдущих работах, посвященных Er- фосфатным волоконным усилителям с той же конфигурацией.

В световодах с накачкой по оболочке максимальное значение коэффициента усиления 13.5 дБ получено в композитном световоде 80х80 мкм, длиной 36 см при мощности входного сигнала на 1550 нм 0.37 мВт. В композитном световоде 100х100 мкм, длиной 23 см максимальное усиление было около 11.5 дБ при мощности сигнала 0.5 мВт. Продемонстрированные значения усиления меньше по сравнению с эрбиевыми кварцевыми волокнами, что в первую очередь обусловлено большими потерями на сварках между композитными и кварцевыми волокнами (от 1.5 дБ до 4 дБ). Несмотря на это, удельное усиление в данной схеме составило 0.4-0.5 дБ/см тогда, как в кварцевых волокнах данное значение составляет порядка 0.01 - 0.03 дБ/см.

Таким образом, использование сердцевины из фосфатного стекла, содержащего высокую концентрацию ионов эрбия, позволило значительно сократить длину активной среды по сравнению с длинами, характерными для аналогичных схем на основе кварцевых волокон.

Экспериментально получено нелинейное сжатие импульсов в активном световоде. Получена пиковая мощность 1.024 кВт при частоте следования импульсов 83 МГц, и 245.7 Вт – для 256 МГц.

## Глава 5. Волоконные лазеры на основе композитных световодов

В данном разделе представлены результаты исследования лазерной генерации композитных световодов. Первый раздел посвящен исследованию непрерывной лазерной генерации, а второй – импульсным лазерам.

## 5.1 Непрерывная лазерная генерация композитных световодов

В оптической схеме, представленной на рисунке 64, была исследована лазерная генерация световода, легированного 3 вес.% ионов эрбия (ЭС#2). Излучение накачки на 976 нм вводилось в сердцевину активного световода через спектрально-селективный ответвитель. Лазерный резонатор был образован волоконной брэгговской решеткой (ВБР) с одной стороны и торцом волокна, сколотым под прямым углом, с другой. Прямой скол торца обеспечивает коэффициент отражения, близкий к 0.04. Коэффициент отражения ВБР на центральной длине волны 1535 нм был близок к единице. Центральная длина волны селективной решетки соответствовала максимуму люминесценции и поглощения ионов эрбия в фосфатной стеклянной матрице. Потери на сварке между спектрально-селективным ответвителем и композитным волокном на длине волны накачки составили порядка 1.0 – 1.1 дБ.



Рисунок 64 – Оптическая схема непрерывного волоконного лазера (AOC – анализатор оптического спектра, BEP – волоконная брэгговская решетка, ЛД – лазерный диод, CCO – спектрально-селективный ответвитель, ЭС – композитный эрбиевый световод).

В эксперименте проводилось измерение спектральных, амплитудновременных характеристик и интегральной мощности выходного излучения для разных мощностей накачки и длин активного оптического волокна. Длина активного световода варьировалась от 5 см до 50 см.

Исследование спектральных и амплитудно-временных характеристик позволило обнаружить различные режимы работы представленного источника. В таблице 4 представлены режимы работы лазера при различных длинах и мощностях накачки.

Мощность									
введенной									
накачки	Выходная мощность ~1.53 мкм, мВт								
~0.98 мкм,									
мВт									
	50 см	39 см	35 см	30 см	25 см	20 см	15 см	10 см	5 см
60	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02		0.5	0.06	
110	0.2	0.2	0.2	0.2	1.5	4.6	6.2	5.7	0.8
160	0.5	0.5	1.0	4.6	9.5	14.3	16.3	13.9	4.6
210	0.9	1.3	5.3	12.8	19.1	24.6	27.6	22.5	8.9
260	1.2	5.6	12.6	23.2	31.0	37.1	39.5	32.0	13.9
320	1.7	13.1	19.5	36.3	45.5	49.8	52.7	42.5	18.8
360	4.2	23.0	29.7	48.4	56.5	63.8	65.5	51.6	22.8
410	7.4	34.3	40.1	61.4	70.3	77.9	78.4	62.6	27.9
460	11.7	45.0	50.5	75.2	83.2	91.1	91.6	71.8	32.6
510	15.6	57.2	61.3	87.5	97.0	105.0	105.0	82.1	38.1

Таблица 4 – Режимы работы волоконного лазера

УСИ
непрерывный режим
импульсный режим

При длине активного волокна 50 см вплоть до мощности накачки 415 мВт на выходе из источника наблюдалось только усиленное спонтанное излучение, отличающееся широким спектральным диапазоном излучения (рисунок 65). При максимальной мощности накачки источник перешел в режим импульсной лазерной генерации. Импульсный режим работы возникает за счет того, что при недостаточной мощности накачки отрезок активного волокна с малой инверсией населенности энергетических уровней выступает в качестве просветляющегося затвора.



Рисунок 65 – Спектры излучения лазера при длине активной среды 50 см.

На рисунке 66 представлены амплитудно-частотные характеристики лазерного излучения на выходе экспериментальной схемы 62 при длине композитного волокна 30 см для разных мощностей введенной накачки. По мере увеличения мощности накачки от 161 мВт до 363 мВт наблюдается рост частоты следования импульсов от 71.8 кГц до 261 кГц. Длительность импульсов, 1.25 мкс. При оцененная на половине интенсивности, составляла около дальнейшем увеличении мощности накачки лазер переходит В квазинепрерывный режим генерации.

Измерение средней выходной мощности позволило установить оптимальную длину световода в волоконном лазере, при которой достигается максимальная дифференциальная эффективность. На рисунке 67 представлены зависимости выходной мощности источника излучения от длины активной среды при максимальной мощности накачки (а) и от мощности поглощенной накачки (б).



Рисунок 66 – Амплитудно-частотные характеристики лазерного излучения на выходе экспериментальной схемы при длине композитного волокна 30 см (в правом верхнем углу указана мощность введенной накачки).

Максимальная дифференциальная эффективность непрерывного лазера достигнута при длине световода 15 см. Она составила 31.8 % по отношению к мощности поглощенной накачки (25.5 % по отношению к мощности введенной накачки). При учете потерь на сварке, которые для данного эксперимента составили порядка 1 дБ, эффективность генерации по отношению к поглощенной мощности накачки составит порядка 39 %.

При дальнейшем сокращении длины световода (менее 15 см) наблюдалось уменьшение выходной мощности источника излучения, связанное со снижением эффективности поглощения накачки. Вместе с тем, выходная мощность при длине активного световода всего 5 см достигала около 38 мВт.



Рисунок 67 – Средняя выходная мощность волоконного лазера: а – в зависимости от длины активного световода при максимальной мощности введенной накачки 510 мВт; б – в зависимости от мощности накачки.

На рисунке 68 представлены выходные спектры лазера при длинах активного световода от 5 до 15 см. Как видно из рисунка, при длине композитного световода 15 см подавление усиленного спонтанного излучения было более 50 дБ. Сокращение длины резонатора не привело к существенному изменению отношения сигнала к УСИ.



Рисунок 68 – Выходные спектры волоконного лазера при мощности накачки 510 мВт при длине активного световода: а – 15 см; б – 10 см; в – 5 см.

Таким образом, экспериментально показано, что при концентрации ионов эрбия Звес.% композитный световод обеспечивает высокую эффективность преобразования излучения накачки в лазерную генерацию. Максимальная выходная мощность составила 105 мВт при длине активного световода всего 15 см. Дифференциальная эффективность с учетом потерь на сварке достигала порядка 38 %.

В экспериментальной схеме непрерывного лазера с накачкой в оболочку (рисунок 69) продемонстрирована возможность получения более высокой выходной мощности лазерной генерации. В качестве активной среды лазера был использован композитный световод, легированный системой эрбий-иттербий, с диаметром сердцевины 10.5 мкм и оболочкой 80х80 мкм (ЭС#4). Длина композитного световода была 36 см.



Рисунок 69 – Оптическая схема непрерывного волоконного лазера с накачкой в оболочку (АОС – анализатор оптического спектра, ВБР – волоконная брэгговская решетка, ЛД – лазерный диод, ЭС – композитный Er/Yb световод).

На рисунке 70 представлены выходные характеристики волоконного лазера. Выходная мощность достигала порядка 500 мВт при мощности лазерного диода накачки 4.2 Вт. Однако увеличенный диаметр сердцевины ЭС#4 значительно ухудшил сварку с кварцевым световодом (потери на сварке от 1.7 до 3 дБ). Дифференциальная эффективность составила всего 11 %. Отражения на сварке и наличие нескольких поперечных мод на рабочей длине волны привели к нестабильности спектральных характеристик лазерной генерации.



Рисунок 70 – Выходные параметры непрерывного лазера с накачкой в оболочку (на вставленном графике выходные спектры).

Использование одномодового композитного световода, легированного 3 вес.% эрбия, и накачки в сердцевину обеспечивает высокую эффективность непрерывной лазерной генерации (до 39%) на длине волны 1535 нм. За счет применения высококонцентрированного эрбий-иттербиевого композитного световода длиной 36 см с накачкой в оболочку возможно получить непрерывную лазерную генерацию мощностью 500 мВт при дифференциальной эффективности источника около 11 %. Исследованные схемы с композитными световодами позволили получить эффективность генерации близкую к сообщенной ранее для полностью фосфатных световодов. Вместе с тем, использование композитной структуры световодов позволило реализовать полностью волоконные схемы лазеров.

### 5.2 Импульсная лазерная генерация одномодового композитного световода

#### 5.2.1 Экспериментальная схема и методики измерений

Для получения импульсного режима генерации выбран метод синхронизации мод за счет нелинейного вращения плоскости поляризации, поскольку, как обсуждалось в обзоре литературы, данный метод не имеет

ограничений по длине волны и не деградирует при генерации импульсов с высокой пиковой мощностью в отличие от просветляющихся поглотителей.

На рисунке 71 изображена схема кольцевого резонатора лазера. Резонатор состоял ИЗ поляризационно-независимого волоконного изолятора, **ДВУХ** поляризационных контроллеров, волоконного поляризационного делителя, спектрально-селективного ответвителя и активного световода. Оптический обеспечивал однонаправленное распространение изолятор излучения И предотвращал нежелательное попадание отраженного лазерного излучения в резонатор лазера. Поляризационный делитель, расположенный между двумя контроллерами поляризации, одновременно обеспечивал синхронизацию мод и служил выходом лазера. В таком резонаторе упрощается запуск режима синхронизации мод и уровень шумов значительно ниже из-за уменьшения отражений В сравнении линейными обратных c резонаторами лазера. Синхронизация мод была получена настройкой ориентации контроллеров поляризации.

Все пассивные волоконные компоненты имели аномальную дисперсию в области рабочих длин волн лазера.



Рисунок 71 – Экспериментальная схема лазера (ЛД – лазерный диод накачки, ССО – спектрально-селективный ответвитель, КП – контроллер поляризации,

ПСД – поляризационный светоделитель, ЭС – эрбиевый световод).

B качестве активной среды использован композитный световод, легированный 3 вес.% ионов эрбия (ЭС#2). Длина активной среды варьировалась от 7 см до 19 см. Для создания инверсии населенности был использован лазерный диод с длиной волны 976 нм и выходной мощностью до 680 мВт. Излучение накачки вводилось в сердцевину активного световода через спектрально-980/1550, в противоположном направлении по селективный ответвитель отношению к обходу резонатора, чтобы исключить излучение накачки на выходе лазера.

Общая длина кольцевого резонатора составляла около 8.5 м, что соответствует основной частоте резонатора порядка 24 МГц.

Проведено измерение средней мощности, спектральных, амплитудновременных и шумовых характеристик лазера. Спектры излучения измерены при помощи анализатора оптического спектра (НР 70004А) с разрешением 0.1 нм.

Измерение амплитудно-временных характеристик выполнено при помощи быстродействующего InGaAs-фотодетектора с волоконным входом (UPD-35-IR2-FC, AlphaLas) и высокочастотного (до 500 МГц) быстродействующего осциллографа (Tektronix).

Шумовые характеристики измерены с помощью широкополосного (0÷3 ГГц) радиочастотного анализатора спектра (GWInstek, GSP-7830). Для измерения длительности фемтосекундных импульсов использовался интерференционный автокоррелятор на основе интерферометра Майкельсона (AA-30DD, Avesta).

## 5.2.2 Результаты и обсуждение

При всех длинах активного световода в резонаторе был получен солитонный режим генерации. На рисунке 72 представлена типичная форма спектра исследованного лазера.

Пики, расположенные симметрично относительно центральной длины волны, называются пиками Келли. Пики Келли образуются в результате конструктивной интерференции дисперсионных волн и распространяющегося солитона на частотах с фазовым согласованием. Согласно [196-198], из данного условия можно найти полную дисперсию резонатора по разности длин волн (или

частот) между пиками и центральной длиной волны. Частотный сдвиг Δν<sub>Kelly,N</sub> пика Келли *N*-порядка является функцией дисперсии групповой задержки и длительности импульса:

$$\Delta \nu_{Kelly,N} \approx \frac{\ln(1+\sqrt{2})}{\pi} \sqrt{\frac{4N}{|\beta_{2,eff}|L} - \frac{1}{\tau_s^2}}$$
(12)

где  $\beta_{2,eff}$  и L - эффективные коэффициент дисперсии и длина резонатора.



Рисунок 72 – Типичный спектр излучения импульсного лазера.

На рисунке 73 представлена зависимость частотного сдвига от порядка пиков Келли. Дисперсия групповой задержки (GDD) резонатора лазера по оценке  $-0,093 \text{ nc}^2$ . GDD исследуемого композитного около составила световода, легированного ионами эрбия, была рассчитана путем вычитания дисперсии стандартных световодов, используемых в резонаторе, из общей дисперсии GDD  $0,066 \text{ mc}^2$ . резонатора. композитного световода была около Соответствующий параметр дисперсии составлял -275 пс/нм/км. Это на порядок выше по сравнению с традиционными эрбиевыми световодами.



Рисунок 73 - Зависимость частотного сдвига от порядка пиков Келли.

Было выполнено исследование влияние длины активной среды на режимы генерации лазера. При настройке лазера для каждой длины активной среды было получено множество различных режимов генерации. На выходе лазера измерялись спектры излучения, автокорреляционные функции и средняя Ha рисунке 74 представлены спектры мощность. излучения И интерферометрическая и автокорреляционные функции при длинах активной 15 см 7 см. 19 см. И Соотношение среды интенсивности пика интерферометрической АКФ к боковым крыльям (peak-to-wings) приближается к 8:1 при сокращении длины активного световода. Кроме того, при сокращении длины активного световода наблюдается рост интенсивности пиков Келли.



Рисунок 74 – Параметры лазера при различных длинах активной среды: а, б – 19 см; в, г – 15 см; д, е – 7 см.

Основные параметры лазерной генерации в зависимости от длины активной среды представлены на рисунке 75. Можно заметить, что в диапазоне длин световода от 7 до 15 см были получены близкие параметры УКИ: длительность импульсов 500±20 фс, энергия импульсов порядка 100±5 пДж, пиковая мощность порядка 200±10 Вт и ТВР 0.55±0.05. При большей длине 19 см наилучшему режиму генерации УКИ соответствовала длительность импульсов около 570 фс, ТВР 0.8 и пиковая мощность около 105 Вт. При сокращении длины активного световода менее 7 см получить синхронизацию мод за счет нелинейного вращения плоскости поляризации не удалось.



Рисунок 75 – Параметры УКИ в зависимости от длины.

стабильности Качество лазерной генерации также оценивалось по генерации. Для каждого режима генерации УКИ были измерены радиочастотные спектры. На рисунке 76 представлена первая гармоника радиочастотного спектра при длинах активной среды 19, 15 и 7 см. Отношение сигнал/шум составило порядка 35 дБ при использовании активного световода длиной 19 см и порядка 50 дБ при длине активного световода от 7 см до 15 см. Во вставленных графиках представлены радиочастотные спектры в диапазоне частот от 0 до 1 ГГц. Спектр для лазера с активной средой длиной 19 см характерен для неидеальной синхронизации мод. При длинах активного световода от 7 до 15 см получена высокая стабильность лазерной генерации.



Рисунок 76 – Радиочастотные спектры вблизи основной частоты фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера в режиме синхронизации мод при длине активной среды: а – 19 см; б – 15 см; в – 7 см.

Таким образом, продемонстрировано, что использование высококонцентрированных композитных световодов позволяет получить стабильную импульсную генерацию с фемтосекундной длительностью импульсов при длине активной среды порядка 7-15 см. Поскольку для лазерной генерации достаточно очень малой длины активного световода, исследованные волокна перспективны для создания лазеров с высокой частотой повторения импульсов.

Стоить отметить, что для каждого стабильного режима генерации инверсия населенности активной среды отличалась. В таблице 5 представлены наилучшие параметры лазерной генерации для каждой длины световода и мощность накачки, при которой были получены данные режимы.

Длина, см	Длительность,	Пиковая	TBP	Мощность	
	фс	мощность, Вт		накачки, мВт	
19	570	105	0.8	115	
15	510	130	0.59	125	
15	512	205	0.554	145	
8	510	170	0.5	160	
7	480	190	0.6	310	

Таблица 5 – Параметры лазера при различных длинах активного световода.

Все исследованные режимы лазерной генерации соответствовали солитоноподобному режиму, условием существования которого является баланс отрицательной дисперсии резонатора и нелинейных эффектов [199], т.е. солитонный режим может существовать в узком диапазоне интенсивности импульсов, обеспечивающей компенсацию дисперсии резонатора. Поэтому, когда лазер был настроен на стабильный режим генерации УКИ, увеличение мощности приводило к увеличению частоты повторения накачки импульсов ИЛИ многоимпульсной лазерной генерации, а не к увеличению пиковой мощности. Вместе с тем, как видно из рисунка 75 и таблицы 5, при различных режимах генерации и одной длине активной среды пиковая мощность варьировалась в широких пределах. Это позволяет предположить, что дисперсия активного световода зависит от инверсии населенности. На рисунке 77 представлены результаты оценки дисперсии композитного световода по формуле 12 для генерации, полученных при длине активной среды 15 см. В режимов мощностей действительно исследованном диапазоне накачки получены различные значения дисперсии. Дисперсия световода уменьшалась с ростом мощности накачки, а пиковая мощность увеличивалась. Вместе с тем, из данных результатов невозможно сделать окончательный вывод о зависимости, поскольку стабильный солитонный режим получен в сравнительно узком диапазоне мощностей накачки. Дисперсия композитного световода, легированного 3 вес.% ионов эрбия, составила 270±40 пс/нм/км.



Рисунок 77 – Зависимость пиковой мощности и дисперсии композитного световода от мощности накачки при длине активной среды в лазере 15 см.

# 5.3 Импульсные волоконные лазеры на основе Er/Yb композитного световода с накачкой в оболочку

Для получения импульсной генерации световода с накачкой в оболочку также была использованы кольцевая схема лазера. Однако из-за того, что световод с накачкой по оболочке был многомодовым на рабочей длине волны, реализовать пассивную синхронизацию за счет нелинейного вращения плоскости поляризации не удалось. Вместо этого, лазер переходил в режим модуляции добротности. Поэтому для получения импульсной генерации была реализована схема с активной синхронизацией мод.

### 5.3.1 Экспериментальная схема и методика эксперимента

На рисунке 78 представлена экспериментальная схема кольцевого лазера с активной синхронизацией мод. В качестве активной среды импульсного лазера был использован композитный световод, легированный системой эрбий-иттербий, со световедущей оболочкой 80х80 мкм (ЭС#4). Длина активного световода в резонаторе была от 31 см до 36 см. Композитный световод был соединен с помощью оптической сварки с одной стороны с выходом объединителя накачки, а с другой – со стандартным одномодовым световодом. Как было показано ранее, одномодовый световод выполнял функцию модового фильтра и предотвращал попадание излучения накачки, распространяющееся по оболочке, в резонатор лазера. Излучение накачки от многомодового лазерного диода с длиной волны 971 нм вводилось в оболочку композитного световода через объединитель накачки.

Активная синхронизация мод была получена при помощи электрооптического модулятора (ЭОМ) (Thorlabs Intensity Modulator LN56S-FC), управляемого генератором сигнала (Tabor Electronics waveform generator WW2571A). На генераторе сигнала устанавливалась частота модуляции, равная собственной частоте резонатора, форма модуляции и её параметры, амплитуда и напряжение смещения.

Перед исследованием импульсного лазера были найдены наиболее эффективные параметры модуляции и во всех последующих экспериментах

использовалась квадратная форма модуляции с амплитудой 3.5 В и напряжением смещения 1.5 В. На выходе лазера измерялись средняя мощность, оптические спектры и осциллограммы. Радиочастотные спектры получены быстрым Фурье-преобразованием осциллограмм.



Рисунок 78 – Экспериментальная схема импульсного лазера с активной синхронизацией мод.

## 5.3.2 Результаты и обсуждение

На выходе лазера измерялись средняя мощность, оптические спектры и осциллограммы. На рисунке 79 представлены выходные спектры и амплитудночастотные характеристики импульсного лазера на основе композитного световода длиной 36 см. В выходных спектрах наблюдались интенсивные узкие пики. Однако в записанных осциллограммах не удалось обнаружить непрерывный сигнал, превышающий уровень шумов (-30 дБ).

Длительность импульсов импульсного лазера с активной синхронизацией мод была в диапазоне наносекунд, временного разрешения фотоприемника и осциллографа было достаточно для измерения длительности импульсов. Во вставленных графиках на рисунке 79 (б) представлены радиочастотные спектры, полученные методом быстрого Фурье-преобразования записанных осциллограмм.

В случае активной синхронизации высокой мод для получения стабильности генерации лазера требуется использовать частоту модуляции, соответствующую собственной частоте резонатора с высокой точностью. При накачки 0.44 Вт минимальной мощности экспериментально ПО значению длительности импульса была определена частота модуляции, которая равнялась 8.68447 МГц. Однако с увеличением введенной мощности накачки форма импульса исказилась, и наблюдалось ухудшение стабильности генерации импульсов. Это свидетельствует о наличии разницы между частотой модуляции и собственной частотой резонатора, которая приводит к временной задержке импульса при многократном обходе контура лазера.



Рисунок 79 – Параметры импульсной генерации лазера на основе композитного световода ЭС#4 длиной 36 см: а – спектры излучения, б – амплитудно-частотные характеристики.

При максимальной мощности накачки 1.18 Вт частота модуляции была изменена. После повторной настройки частоты модуляции, которая отличалась от исходного значения всего на 180 Гц и составила 8.68429 МГц, удалось получить более хорошую форму импульса и повысить стабильность лазерной генерации (рис. 80). Однако длительность импульса на половине высоты также составляла 2.3 нс.



Рисунок 80 – Амплитудно-частотные характеристики при мощности накачки 1.18 Вт при частоте модуляции 8.68429 МГц.

При длине активного световода 31 см получена более высокая стабильность генерации импульсного лазера. На рисунке 81 представлены спектральные и амплитудно-частотные характеристики лазера при различных мощностях накачки. В данном случае частота модуляции равнялась 8.744547 МГц.



Рисунок 81 – Параметры импульсной генерации лазера на основе композитного световода ЭС#4 длиной 31 см: а – спектры излучения, б – амплитудно-частотные характеристики.

Из значений средней мощности были рассчитаны энергия импульсов и пиковая мощность импульсов. На рисунке 82 представлены зависимости данных параметров от введенной мощности накачки. Максимальная энергия импульса достигала 5 нДж.



Рисунок 82 – Зависимости параметров импульсного сигнала от мощности введенной накачки: а – энергия импульса; б – пиковая мощность.

Для сравнения была исследована такая же конфигурация лазера с активной синхронизацией мод на основе традиционного эрбиевого световода. В качестве активной среды лазера был использован эрбиевый световод AE020, производства Пермской научно-производственной приборостроительной компании. Поглощение слабого сигнала AE020 на длине волны накачки на 976 нм было около 10 дБ/м, а в пике на 1530 нм – порядка 20 дБ/м. Световод был одномодовым на рабочей длине волны. Длина волны отсечки второй моды была около 1.3 мкм. Длина активного световода в резонаторе составляла 2.5 м. Для создания инверсии населенности излучение накачки от одномодового полупроводникового лазерного диода с длиной волны генерации 976 нм вводилось в сердцевину эрбиевого световода через спектрально-селективный ответвитель.

На рисунке 83 представлены выходные спектры и амплитудно-частотные характеристики лазера. Как видно из рисунка 83, при использовании традиционного световода в аналогичной конфигурации лазера достигается более стабильная генерация импульсов. Спектр имеет форму, близкую к Гауссу.





спектры; б – амплитудно-частотные характеристики.

На рисунке 84 представлены энергетические характеристики импульсного лазера. Максимальная энергия импульсов достигала 1.5 нДж.



Рисунок 84 – Энергия импульса и пиковая мощность импульсного лазера на основе AE020 при различных мощностях накачки.

Таким образом, использование накачки в оболочку позволяет получить более высокую энергию импульсов. При этом, благодаря высокой концентрации ионов РЗЭ в сердцевине композитного световода, для получения высокой энергии импульсов потребовалась длина активного световода на несколько порядков меньше в сравнении с традиционными эрбиевыми световодами.

## 5.4 Выводы к главе V

В настоящей главе представлены результаты исследования непрерывной и импульсной лазерной генерации композитных световодов, как с накачкой в сердцевину, так и с накачкой по оболочке.

Использование одномодового композитного световода, легированного 3 вес.% эрбия, и накачки в сердцевину обеспечивает высокую эффективность непрерывной лазерной генерации (до 38 %) на длине волны 1535 нм. За счет применения высококонцентрированного эрбий-иттербиевого композитного световода длиной 36 см с накачкой в оболочку возможно получить непрерывную лазерную генерацию мощностью 500 мВт при дифференциальной эффективности источника около 11 %. Исследованные схемы с композитными световодами позволили получить эффективность генерации близкую к сообщенной ранее для полностью фосфатных световодов. Вместе с тем, использование композитной структуры световодов позволило реализовать полностью волоконные схемы лазеров.

Благодаря высокой концентрации ионов РЗЭ в сердцевинах исследованных световодов, была получена импульсная лазерная генерация при длине активной среды на несколько порядков меньшей в сравнении с традиционными световодами. Была получена генерация фемтосекундных импульсов в лазере с пассивной синхронизацией мод за счет нелинейного вращения плоскости поляризации. Длина композитного световода, легированного 3 вес.% ионов эрбия, в резонаторе составляла от 7 до 15 см. Исследование генерации УКИ позволило рассчитать дисперсию композитного световода, которая составила 270±40 пс/нм/км.

### Заключение

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 6.5x10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup>.

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 сигналшум 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.

Приложение 1 Перевод концентрации из весовых процентов в ионы на см<sup>3</sup>

$$n[cm^{-3}] = \frac{N}{V[cm^{3}]} - \text{ концентрация ионов в см}^{-3}.$$

$$N = \frac{m_{Er}[\Gamma]}{M_{Er}[\Gamma/MOЛЬ]} N_{A}[MOЛЬ^{-1}] - \text{общее число ионов эрбия}$$

$$N_{A} = 6.022 * 10^{23} \text{ моль}^{-1} - \text{число Авогадро}$$

$$\rho \left[\frac{\Gamma}{cM^{3}}\right] = \frac{m[\Gamma]}{V[cM^{3}]}$$

$$m[\Gamma] = \frac{m_{Er}[\Gamma]}{w_{Er}[Bec.\%]} \cdot 100\%$$

$$= > n[cm^{-3}] = \frac{\rho[\Gamma/CM^{3}] \cdot w_{Er}[Bec.\%]}{M_{Er}\left[\frac{\Gamma}{MOЛЬ}\right] \cdot 100\%} \cdot N_{A}[MOЛЬ^{-1}]$$
Плотность стёкол составляет:

$$ho(SELG) = 2.9 \ г/см^3$$
  
 $ho(SiO_2) = 2.201 \ г/см^3$ 

# Приложение 2 Влияние волоконных компонентов на длительность импульсов

При распространении через среду с квадратичной дисперсией импульса групповая скорость распространения различных спектральных компонент импульса отличается. Поэтому длительность лазерного импульса  $\tau_{out}$  увеличивается с расстоянием *z*. Для Гауссова импульса увеличение длительности может быть оценено, как:

$$\tau_{out}(z) = \tau_{in} \left( 1 + \left(\frac{z}{L_d}\right)^2 \right)^{0.5}$$
(3.1)

где L<sub>d</sub> - длина дисперсионного расплывания волнового пакета (дисперсионная длина);  $\tau_{in}$  – длительность импульса на входе.

$$L_d = \frac{\tau_{in}^2}{|k_2|} = \frac{\tau_{in}^2}{\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}}$$
(3.2)

где  $\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}$  - дисперсия групповой скорости второго порядка (или дисперсия групповой задержки).

Влияние волоконных компонентов на параметры задающего генератора было исследовано для импульсного лазера, параметры которого изображены на рисунке 3.1. Ширина выходного спектра на половине высоты с центральной длиной волны около 1540.3±0.4 была 7.3 нм. Длительность импульсов задающего импульсного лазера составляла около 475±25 фс, TBP=0.44.

При распространении через стандартный одномодовый световод с дисперсией на длине волны 1540 нм около 18 пс/(нм км), дисперсия групповой скорости второго порядка (или дисперсия групповой задержки, GDD) была рассчитана из уравнения:

$$\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = \beta_2 = -\frac{D \cdot \lambda^2}{2\pi c} = -\frac{18 \cdot (1540)^2 \cdot 10^3}{2 \cdot 3.1415 \cdot 3 \cdot 10^8 10^9} = -22.65 \; (\text{mc}^2/\text{km}) \; (3.3)$$

При данных условиях дисперсионная длина составляет  $L_d = 9.96$  м.

В наших экспериментах длина световодов для доставки не превышала 3 м, что приводит к незначительному увеличению длительности импульса, приблизительно на 4.4 %. Однако для доставки излучения к автокоррелятору необходимо было использовать изолятор, дисперсия которого не известна. Было выполнено исследование влияния изолятора и пассивных компонентов усилителя на длительность импульсов. На рисунке 3.1 (б) представлены автокорреляционные функции для задающего генератора до и после прохождения волоконных компонентов. С помощью уравнения (3.4) была оценена дисперсия групповой скорости второго порядка GDD компонентов (таблица 3.1):



Рисунок 3.1 – Параметры УКИ: а – спектр излучения; б - автокорреляционные функции, измеренные для исходного сигнала и после прохождения волоконнооптической схемы усилителя.

	Длительность, фс	GDD, пс <sup>2</sup>
Исходный сигнал	459	
ISO и WDM усилителя	560	0.053
Выходной изолятор	594	0.062

Таблица 3.1 – Влияние волоконных компонентов на длительность УКИ.

## Благодарности

Автор благодарит своего научного руководителя доктора физикоматематических наук Цветкова Владимира Борисовича за помощь на всех этапах работы над диссертацией. Особая благодарность сотруднику лаборатории активных сред твердотельных лазеров ИОФ РАН Камынину Владимиру Александровичу за помощь в организации и проведении экспериментов, регулярные консультации и обсуждение полученных результатов.

Автору хочется выразить признательность сотрудникам лаборатории концентрированных лазерных материалов ИОФ РАН, Галагану Борису Ивановичу, Сверчкову Сергею Евгеньевичу и Денкеру Борису Ильичу за активные обсуждения, полезные рекомендации и помощь в написании статей.

Автор выражает благодарность сотрудникам НЦВО РАН, Егоровой Ольге Николаевне за предоставленные образцы экспериментальных световодов и полезные обсуждения и Медведкову Олегу Игоревичу за изготовление волоконных брэгговских решеток, которые были использованы при выполнении работы.

Автор благодарит коллектив Пермской научно-производственной приборостроительной компании (ПАО ПНППК) за всестороннюю поддержку и предоставленные образцы эрбиевых кварцевых световодов.

# 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 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 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 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 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  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  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. – No. 7. – 075101(4pp).

5. Галаган, Б.И. Композитные световоды с Ег/Үb 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.% Erdoped 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.  $- N_{2}$ 8. - 085103 (4 pp).

7. Denker, B. I. Gain characteristics of fibers with a heavily erbium-doped phosphatebased 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.

# Публикации в сборниках трудов конференций:

1. Поносова, А.А. Широкополосный волоконный эрбиевый источник / А.А. Поносова, О.Л. Кель, А.И. Семерикова, А.С. Курков //Фотон-экспресс. - 2015. -№ 6 (126). - С. 91-92.

2. Поносова, А.А. Широкополосный волоконный эрбиевый источник излучения/А.А. Поносова, О.Л. Кель, А.И. Семерикова, А.С. Курков//Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение : прогр. и материалы 14-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск, 29 сен. – 2 окт. 2015 г. / редкол.: К. Н. Нищев (отв. ред.) [идр.]. –Саранск, 2015 – С. 68.

3. Galagan, B.I. Compact All-Fiber Infrared Broadband Source Based on High-Concentration Er/Yb Composite Optical Fiber/ B.I. Galagan, O.N. Egorova, B.I.Denker, V.A. Kamynin, **A.A. Ponosova**, S.E. Sverchkov, S.L. Semjonov, V.B. Tsvetkov// The 24th Annual International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'16. - Galway, Ireland, 12-16 September 2016. - LSM-P-2.

4. Галаган, Б.И. Компактный широкополосный волоконный источник излучения на основе Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> композитного 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//Материалы Российского семинара по волоконным лазерам. – Новосибирск, Академгородок, 2016. - С.57-58.

5. Галаган, Б.И. Широкополосный волоконный источник на основе высоколегированного  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  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//Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: прогр. и материалы 15-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск, 11 окт. – 14 окт. 2016 г. / редкол.: К. Н. Нищев (отв. ред.) [и др.]. –Саранск, 2016 – С. 62.

6. Галаган, Б.И. Компактный усилитель на основе высоколегированного Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 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//Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: прогр. и материалы 16-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск, 19 сент. – 22 сент. 2017 г. / редкол.: К. Н. Нищев (отв. ред.) [и др.]. –Саранск, 2017 – С. 64.

7. Denker, B.I. Compact Continuous Wave Fiber Laser Based on High-Concentration Er<sup>3+</sup> Composite Fiber/ B.I.Denker, O.N. Egorova, B.I. Galagan, V.A. Kamynin, A.A. **Ponosova**, S.E. Sverchkov, S.L. Semjonov, V.B. Tsvetkov//2018 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE, 2018. – P. 67.

8. Галаган, Б.И. Композитные световоды с Ег3+ фосфатной сердцевиной для компактных волоконных 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//Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: прогр. и материалы 17-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск, 18 сент. – 21 сент. 2018 г. / редкол.: К. Н. Нищев (отв. ред.) [и др.]. – Саранск, 2018 – С. 25.

9. Галаган, Б.И. Исследование усиления коротких лазерных импульсов в высококонцентрированном эрбиевом волокне/ Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, О.Н. Егорова, И.В. Жлуктова, В.А. Камынин, **А.А. Поносова**, С.Е. Сверчков, С.Л. Семенов, В.Б. Цветков//Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: прогр. и материалы 17-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск, 18 сент. – 21 сент. 2018 г. / редкол.: К. Н. Нищев (отв. ред.) [и др.]. – Саранск, 2018 – С. 34.

10. Denker, B.I. High-Concentration Er<sup>3+</sup> Composite Fiber for Compact All-Fiber Devises/ B.I.Denker, O.N. Egorova, B.I. Galagan, V.A. Kamynin, **A.A. Ponosova**, S.E. Sverchkov, S.L. Semjonov, V.B. Tsvetkov, I.V. Zhluktova// The 26th Annual International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'18. - Tarragona, Spain, 9-14 September 2018. - LS-P-5.

11. Галаган, Б.И. Перспективные активные волоконные среды для источников излучения С-диапазона/Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, В.А. Камынин, **А.А. Поносова**, С.Е. Сверчков, С.Л. Семенов, В.Б. Цветков//Тезисы докладов шк.-конф. молодых ученых ИОФ РАН «Прохоровские недели». – Москва, 2018. - С.28-31

12. Галаган, Б.И. Компактные усилители на базе композитных световодов с сильнолегированной эрбием фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой/ Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, В.А. Камынин, **А.А. Поносова**, С.Е. Сверчков, С.Л. Семенов, В.Б. Цветков//XVI Всероссийский молодежный Самарский конкурсконференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник трудов конференции, (Самара, 13–17 ноября 2018 г.). – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 2018. – С.173-180.

13. Галаган, Б.И. Фемтосекундный импульсный лазер на основе композитного световода с фосфатной сердцевиной, легированной 3 вес.% эрбия/ Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, В.А. Камынин, **А.А. Поносова**, С.Е. Сверчков, С.Л. Семенов, В.Б. Цветков//Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2019», (Москва, 8-12 апреля 2019). – М: МАКС Пресс, 2019. - С.437-438

14. Denker, B.I. Lasing and Gain Properties of Multicomponent Optical Fibers with Heavily Er-doped Phosphate Core and Silica Cladding/ B.I.Denker, O.N. Egorova, B.I.
Galagan, V.A. Kamynin, A.A. Ponosova, S.E. Sverchkov, S.L. Semjonov, V.B. Tsvetkov, I.V. Zhluktova// CLEO/Europe-EQEC - Munich, Germany, 23-27 June 2019.
15. Denker, B.I. Femtosecond Laser Based on 7-cm-Long Heavily Er-Doped Multicomponent Fiber/ B.I.Denker, B.I. Galagan, V.A. Kamynin, A.A. Ponosova, S.E. Sverchkov, S.L. Semjonov, V.B. Tsvetkov// 28th International Laser Physics Workshop (LPHYS'19) - Gyeongju, South Korea, 8-12 July 2019.

## Список сокращений

АКФ – автокорреляционная фунция

АОС – анализатор оптического спектра

ВБР – волоконная Брэгговская решетка;

ВОГ – волоконно-оптический гироскоп;

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи;

ВС – волоконный световод;

дБ – децибел;

ИК – инфракрасное излучение;

КПД – коэффициент полезного действия

ЛД – лазерный диод

мкм – микрон (микрометр);

ПП – показатель преломления;

РЗЭ – редкоземельные элементы;

СВИ (SFS) – суперлюминесцентный волоконный источник излучения (Superluminescence<sup>3</sup> Fiber Source);

CCO (WDM)– спектрально-селективный ответвитель (Wavelength-Division Multiplexing);

УСИ (ASE) – усиленное спонтанное излучение (Amplified Spontaneous Emission);

УКИ – ультракороткий импульс

УФ – ультрафиолетовое излучение;

ЭС (EDF) – эрбиевый световод (Erbium-doped fiber)

MCVD – модифицированное химическое парофазное осаждение

 $<sup>^3</sup>$  В англоязычной литературе часто используется термин "Superfluorescence Fiber Source". Однако он неверен с точки зрения толкования [200].

## Список использованной литературы

1. Као Ч.К. Песок давно минувших дней шлёт в будущее голоса людей// Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180. – № 12. – С. 1350-1356.

2. Wysocki P.F. Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications/ P.F. Wysocki [et al.]// Journal of Lightwave Technology.  $-1994. - Vol. 12. - N_{2} 3. - P. 550-567.$ 

3. Kim Y. Er-doped fiber frequency comb with mHz relative linewidth/ Y. Kim [et al.]// Optics express.  $-2009. - Vol. 17. - N_{2}. 14. - P. 11972-11977.$ 

4. Yao H. Optimization of resonantly cladding-pumped erbium-doped fiber amplifiers for space-borne applications/ H. Yao, M. W. Wright, and J. R. Marciante // Applied optics. -2013. - Vol. 52. - No 17. - P. 3923-3930.

5. Jasapara J.C. Diffraction-limited fundamental mode operation of core-pumped verylarge-mode-area Er fiber amplifiers/ J.C. Jasapara [et al.]// IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics.  $-2009. - Vol. 15. - N \ge 1. - P. 3-11.$ 

6. Jasapara J.C. Picosecond pulse amplification in a core-pumped large-mode-area erbium fiber/ J.C. Jasapara [et al.]// Optics letters. – 2007. – Vol. 32. – № 16. – P. 2429-2431.

7. Morin F. Microjoule femtosecond fiber laser at 1.6  $\mu$ m for corneal surgery applications/ F. Morin [et al.]// Optics letters. – 2009. – Vol. 34. – No 13. – P. 1991-1993.

8. Kim K. 215μJ 16W femtosecond fiber laser for precision industrial micro-machining/ K. Kim [et al.] // Proc. SPIE 8961, Fiber Lasers XI: Technology, Systems, and Applications. – International Society for Optics and Photonics. - 2014. – V. 8961. – P. 89610N (10 pp).

9. Mears R.J. High-gain rare-earth-doped fiber amplifier at 1.54  $\mu$ m/ R.J. Mears [et al.]//Optical Fiber Communication Conference (Reno, Nevada United States 19 January 1987). – Optical Society of America, 1987. – P. WI2.

10. Desurvire E.E. High-gain Erbium doped traveling wave fiber amplifier/ E.E. Desurvire, R.J. Simpson, and P.C. Becker // Optics Letters. – 1987. – Vol. 12. - № 11. – P. 888-890.

11. Mears R.J. Low noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 µm/ R.J. Mears [et al.] // Electronics Letters. - 1987. - Vol. 23. - № 19. - P. 1026-1028.

12. Optical Fiber Telecommunications III / [edited by] I.P. Kaminov, T.L. Koch. – San Diego: Academic press, 1997. – 515 p.

13. Kir'yanov A.V.  $Er^{3+}$  Concentration Effects in Commercial Erbium-Doped Silica Fibers Fabricated Through the MCVD and DND Technologies/ A.V. Kir'yanov [et al.]//IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2013. – Vol. 49. – No 6. – P. 511–521.

14. Stone B.T. Fluorescence properties of Er<sup>3+</sup>-doped sol-gel glasses/ B.T. Stone, K.L. Bray// Journal of Noncrystalline Solids. – 1996. – Vol. 197 - P. 136–144.

15. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учеб. пособие/ Г.А. Иванов, В.П. Первадчук. - Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. унта, 2011. – 171 с.

16. Myslinski P. Performance of high-concentration erbium-doped fiber amplifiers/
P. Myslinski [et al.]//IEEE Photonics Technology Letters. – 1999. – Vol. 11. - P. 973-975.

17. Craig-Ryan S.P. Optical study of low concentration  $\text{Er}^{3+}$  fibers for efficient power amplifiers/ S.P. Craig-Ryan [et al.]// ECOC'90 Proc. – 1990. – Vol. 1. – P. 571-574.

18. Плоцкий А.Ю. Усилительные свойства активных световодов с высокой концентрацией ионов эрбия/ А.Ю. Плоцкий [и др.]//Квантовая электроника. – 2005. - Т. 35. - № 6. – С. 559-562.

19. Aljamimi S.M. Fabrication of Aluminum Doped Silica Preform using MCVD and Solution Doping Technique: Soot analyses and Solution Concentration effect/ S.M. Aljamimi [et al.]// Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 896. - P. 197-202.

20. Дианов Е.М. Методы сглаживания спектра усиления эрбиевых волоконных усилителей/ Дианов Е.М. [и др.]//Квантовая электроника. – 1996. - Т. 23. - № 12. - С. 1059-1064.

21. Abramov A.N. Fabrication of Heavily Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Doped Aluminophosphosilicate Glass Fibers/ A.N. Abramov [et al.]//Inorganic Materials. - Vol. 46. - № 4. - P. 439–444.

22. Лихачев М.Е. Фософороалюмосиликатные световоды, легированные оксидом эрбия/М.Е. Лихачев [и др.]//Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. - № 7. – Р. 633–638.

23. Lipatov D.S. Fabrication of Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub> Optical Fibers with a Perfect Step-Index Profile by the MCVD Process/ D.S. Lipatov [et al.]// Inorganic Materials. – 2018. - Vol. 54. - № 3. - P. 276–282.

24. Li L. Short cladding-pumped Er/Yb phosphate fiber laser with 1.5 W output power/ Li L. [et al.]// Applied Physics Letters. – 2004. - № 85. - P. 2721–3.

25. Yamashita S. Passively mode-locked short-cavity 10 GHz Er:Yb-codoped phosphate-fiber laser using carbon nanotubes./ S. Yamashita [et al.]// Proceedings of the SPIE, Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications. – 2007. – Vol.6453. - P. 64531Y-1.

26. Ye N.N. 7-GHz high-repetition-rate mode-locked pulse generation using short-cavity phosphate glass fiber laser/ N.N. Ye [et al.]// Laser Physics. - 2012. - Vol. 22. -  $N_{2}$  7. - P. 1247-1251.

27. Thapa R. All-fiber fundamentally mode-locked 12 GHz laseroscillator based on an Er/Yb-doped phosphate glass fiber./ R. Thapa [et al.]// Optics Letters. -2014. - Vol. 39.  $- N_{2} 6$ . - P. 1418-1421.

28. Dorosz D. Rare earth ions doped alumosilicate and phosphate double clad optical fibers/ D. Dorosz//Bulletin of the polist academy of science. Technical sciences. – 2008. – Vol. 56. - № 2. - P. 103-111.

29. Chen L. An efficient erbium doped phosphate laser glass for high average power pumping/ L. Chen [et al.]//Journal of Alloys and Compounds. - 2009. – Vol. 482. - № 1- 2. – P. 261-263.

30. Zhang J. Preparation and ASE Spectrum of Single-Mode Erbium Doped Tellurite Glass Fiber with D-type Cladding Geometry/ J. Zhang [et.al.] // Journal of Materials Science & Technology. – 2004. - Vol. 20. - № 6. - P. 671-674.

31. Huang L. Broadband emission in  $\text{Er}^{3+}$ -Tm<sup>3+</sup> codoped tellurite fibre/ L. Huang [et al.]//Optics Express. – 2004. - Vol. 12. - No 11. - P. 2429-2434.

32. Кравченко В.Б. Лазернаые фосфатные стёкла (обзор)/ В.Б. Кравченко, Ю.П. Рудницкий//Квантовая электроника. – 1979. - Т. 6. - № 4. - С. 661-689.

33. Лазерные фосфатные стекла/под ред. М.Е. Жаботинского - М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980 – 352 с.

34. Shan-Hui X. Gain Characteristics of Er<sup>3+</sup>-Doped Phosphate Glass Fibres/ X. Shan-Hui [et al.]//Chinese Physics Letters. – 2006. – Vol. 23. - № 3. – P. 633-634.

35. Boetti N.G. Highly Doped Phosphate Glass Fibers for Compact Lasers and Amplifiers: A Review/ N.G. Boetti [et al.] //Applied Sciences. - 2017. – Vol. 7. № 12.-P. 1295 (18 pp.).

36. Jiang C. Improved gain characteristics of high concentration erbium-doped phosphate fiber amplifier/ C. Jiang, W. Hu, and Q. Zeng//IEEE Photonics Technology Letters. -2004. - Vol. 16. - No 3. - P. 774-776.

37. Ohtsuki T. Gain characteristics of a high concentration  $Er^{3+}$ -doped phosphate glass waveguide/ T. Ohtsuki [et al.]//Journal of applied physics. – 1995. – Vol. 78. -  $N_{2}$  6. - P. 3617-3621.

38. Hwang B.C. Performance of high-concentration Er<sup>3+</sup>-doped phosphate fiber amplifiers/ B.C. Hwang [et al.]//IEEE Photonics Technology Letters. – 2001. – Vol. 13. – № 3. - P. 197-199.

39. Jiang S. Erbium-doped phosphate fiber amplifiers/ S. Jiang//Proc. SPIE Active and Passive OpticalComponents for WDM Communications III. – 2003. - Vol. 5246. - P. 201-207.

40. Shan-Hui X. Efficient Fibre Amplifiers Based on a Highly  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  Codoped Phosphate Glass-Fibre/ X. Shan-Hui [et al.]//Chinese Physics Letters. - 2009. – Vol. 26. -  $N_{2}$  4. – P. 047806 (3 pp.).

41. Hu Y. Performance of High-Concentration  $Er^{3+}$ -Yb<sup>3+</sup>-Codoped Phosphate Fiber Amplifiers/ Y. Hu [et al.]//IEEE Photonics Technology Letters. – 2001. – Vol. 13. –  $N_{2}$  7. – P. 657-659.

42. Вельмискин В.В. Иттербий-эрбиевое лазерное волокно с фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой/ В.В. Вельмискин [и др.]// Фотон-экспресс. – 2013. – Т. 110. - № 6. – С. 148.

43. Denker B.I. Composite laser fiber with Yb, Er co-doped phosphate glass core and silica cladding/ B.I. Denker [et al.]// Laser Physics Letters. -2013. - Vol. 10.  $- N_{2} 5$ . - P. 055109.

44. Egorova O.N. Phosphate-core silica-clad Er/Yb-doped optical fiber and cladding pumped laser/O. N. Egorova [et al.]//Optics Express. – 2014. – Vol. 22. - № 7. – P. 7625-7630.

45. Martin R.A. Silica-clad neodymium-doped lanthanum phosphate fibers and fiber lasers/ R.A. Martin, J.C. Knight//IEEE photonics technology letters. -2006. - Vol. 18. - N 4. - P. 574-576.

46. Goel N.K. An optical amplifier having 5 cm long silica-clad erbium doped phosphate glass fiber fabricated by "core-suction" technique/ N.K. Goel, G. Pickrell, & R. Stolen//Optical Fiber Technology. -2014. - Vol. 20.  $- N_{2} 4$ . - P. 325-327.

47. Righini G.C. Photoluminescence of rare-earth-doped glasses/ G.C. Righini, M. Ferrari//Rivista del nuovo cimento. – 2008. – Vol. 28.- № 12. - P. 1-53.

48. Blixt P. Concentration-dependent upconversion in  $Er^{3+}$ -doped fiber amplifiers: Experiments and modeling/ P. Blixt [et al.]// IEEE photonics technology letters. – 1991. – Vol. 3. – No. 11. – C. 996-998.

49. Савельев Е. А. Кластеризация иттербия в оптических волноводах на основе аморфного диоксида кремния : дис. ... канд. тех. наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), 2018.

50. Savelii I. Benefit of Rare-Earth "Smart Doping" and Material Nanostructuring for the Next Generation of Er-Doped Fibers./ I. Savelii [et al.]// Nanoscale research letters. – 2017. – Vol. 12. – № 1. – P. 206 (8 pp.).

51. van den Hoven G.N. Absorption and emission cross sections of  $\text{Er}^{3+}$  in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  waveguides/ G.N. van den Hoven [et al.]// Applied optics. – 1997. – Vol. 36. – No 15. – P. 3338-3341.

52. Dybdal K. Spectroscopic properties of Er-doped silica fibers and preforms/ K. Dybdal [et al.]//Fiber Laser Sources and Amplifiers. – 1990. – Vol. 1171. - P. 209-218.

53. Wagener J.L. Effects of concentration and clusters in erbium-doped fiber lasers/ J.L. Wagener [et al.]//Optics letters. – 1993. – Vol. 18. – № 23. – P. 2014-2016.

54. Morishita Y. Concentration effect of erbium-doped silica based multi-component glass fibers/ Y. Morishita, K. Muta, N. Sugiyama//MRS Online Proceedings Library Archive. – 1991. – Vol. 244. – P. 163-168.

55. Жукова М.Н. Измерение населенности метастабильного уровня стекол, активированных ионами эрбия/ М.Н. Жукова, В.А. Асеев, Н.В. Никоноров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. Современная физика. Труды молодых ученых. – 2007. - № 37. – С. 89-96.

56. Karimi M. Theoretical comparative studies of cross-section evaluation in erbiumdoped optical fibers/ M. Karimi, F.E. Seraji// Progress In Electromagnetics Research. – 2010. - Vol. 23. – P. 147-164.

57. Shimizu M. Concentration effect on optical amplification characteristics of Erdoped silica single-mode fibers/ M. Shimizu [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters.  $-1990. - Vol. 2. - N \ge 1. - P. 43-45.$ 

58. Pugliese D. Concentration quenching in an Er-doped phosphate glass for compact optical lasers and amplifiers/ D. Pugliese [et al.] //Journal of Alloys and Compounds. – 2016. - Vol. 657. – P. 678-683.

59. Khopin V.F. Doping of optical fiber preforms via porous silica layer infiltration with salt solutions/ V.F. Khopin [et al.]// Inorganic Materials. -2005. - Vol. 41.  $- N_{2}$  3. - P. 303-307.

60. Егорова О.Н. Световоды с высокой концентрацией активных редкоземельных ионов с сердцевиной из фосфатногостекла и оболочкой из кварцевого стекла/ О. Н. Егорова [и др.]//Квантовая электроника. – 2016. - Т. 46. - № 12. – С. 1071-1076.

61. Мелькумов М.А. Влияние концентрации и методики введения ионов Yb<sup>3+</sup> и Er<sup>3+</sup> на эффективность передачи возбуждения в Er-Yb- фосфоросиликатных световодах/ М.А. Мелькумов [и др.]//Неорганические материалы. – 2010. - Т. 46. - № 3. - С. 1-6.

62. Melkumov M.A. Ytterbium lasers based on  $P_2O_5$ - and  $Al_2O_3$ -doped fibers/ Melkumov M.A. [et al.] // Proceedings of the Europeen Conference on Oprical Communication, Stockholm, Sweden. – 2004. – P. 5-9.

63. Zhang J. Fabrication and emission properties of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  codoped tellurite glass fiber for broadband optical amplification/ J. Zhang [et al.] //Journal of luminescence. – 2005. – Vol. 115. – No 1-2. – P. 45-52.

64. Арзуманян Г.М. Спектрально-структурные характеристики ап-конверсионно люминесцирующих оксифторидных стекол и нанокерамик на их основе, допированных ионами Er<sup>3+</sup> и Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>/ Г.М. Арзуманян [и др.] – Дубна, 2013. – 20 с. – (Препринт/Объединенный институт ядерных исследований)

65. Pokhrel M. Highly efficient NIR to NIR and VIS upconversion in  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$  doped in M<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S (M= Gd, La, Y)/ M. Pokhrel, G.A. Kumar, D.K. Sardar //Journal of Materials Chemistry A. – 2013. – Vol. 1. – No. 38. – P. 11595-11606.

66. Асеев B.A. Влияние концентрации активаторов на вероятность безызлучательного переноса энергии в высококонцентрированных иттербийэрбиевых стеклах/ B.A. Асеев И др.]//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. Исследования в области приборостроения. – 2006. - № 26. - С. 123-128.

67. Artem'ev E.F. Some characteristics of population inversion of the  ${}^{4}I_{13/2}$  level of erbium ions in ytterbium–erbium glasses/ E.F. Artem'ev [et al.]//Sov. J. Quantum Electron. – 1981. – Vol. 11. – No 9. – P. 1266-1268.

68. Feng X.Spectroscopic properties of erbium-doped ultraphosphate glasses for 1.5 μm amplification/ X. Feng, S. Tanabe, and T. Hanada//Journal of Applied Physics. – 2001. – Vol. 89. - № 7. - P. 3560-3567.

69. Sardar D.K. Judd–Ofelt analysis of the  $Er^{3+}(4f^{11})$  absorption intensities in phosphate glass:  $Er^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$ / D.K. Sardar [et al.]//Journal of applied physics. – 2003. – Vol. 93. –  $N_{2}$  4. – P. 2041-2046.

70. Физическая энциклопедия: в 5 т./ Гл. ред. А. М. Прохоров, редкол.: Д.М. Алексеев [и др.]. — М., 1988 — 1998. — ISBN 5-85270-034-7.

71. Li M. Gamma radiation effects on the DPB SFS in space FOGs applications/ M. Li [et al.]//Optik-International Journal for Light and Electron Optics. – 2012. - Vol. 123. - № 17. - P. 1542-1545.

72. Звелто О. Принципы лазеров./ пер. с англ. под ред. Т.А. Шмаонова - 4-е изд. – СПб.: Лань, 2008. - 720 с.

73. R. Paschotta, J. Nilsson, A.C. Tropper, D.C. Hanna, «Efficient superfluorescent light source with broad bandwidth,» IEEE Journal of selected topics in quantum electronics,  $\tau$ . 3, No 4, p. 1097 – 1099, 1997.

74. Грух Д.А. Широкополосный источник излучения на основе иттербиевого волоконного световода с распределенной по длине накачкой/ Д.А. Грух [и др.] //Квантовая электроника. – 2004. - Т. 34. - № 3. – С. 247-248.

75. Кальянов А.Л. Оптическая низкокогерентная интерферометрия и томография: Учебное пособие./ А.Л. Кальянов, В.В. Лычагов, Д.В. Лякин, О.А. Перепелицына, В.П. Рябухо. - Саратов, 2009. – 86 с.

76. Алексеев Э.И. Избыточный шум Er/Yb-волоконного суперфлуоресцентного источника излучения/ Э.И. Алексеев [и др.] //Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23. – №. 23. – С. 1-6.

77. Ribeiro A.B.L. Optical fiber sources for measurement and imaging/ A.B.L. Ribeiro,
M. Melo, J.R. Salcedo //1st Canterbury Workshop on Optical Coherence Tomography
and Adaptive Optics. – International Society for Optics and Photonics, 2008. – T. 7139.
– C. 713903.

78. Jinlong C. Experimental optimization of an erbium-doped super-fluorescent fiber source for fiber optic gyroscopes/ C. Jinlong, T. Manqing //Journal of Semiconductors.  $-2011. - Vol. 32. - N \ge 10. - P. 104007 (5 pp.).$ 

79. Nageswara Rao P. 1.3 mW 1550 nm Er-doped super fluorescent fiber source for missile fiber optics gyroscope/ P. Nageswara Rao, S.K. Shrivastava //Journal of Advances in Physics. – 2014. - Vol. 5. - № 3. - P. 993-1000.

80. Wang L.A. Polarized erbium-doped superfluorescent fiber source utilizing doublepass backward configuration./ L.A. Wang, C. Te Lee, and G.W. You //Applied optics. –  $2005. -Vol. 44. - N \ge 1. - P. 77-82.$ 

81. Wysocki P.F. Wavelength stability of a high-output, broadband, Er-doped superfluorescent fiber source pumped near 980 nm/ P.F. Wysocki, M.J.F. Digonnet, and B.Y. Kim // Optics letters. – 1991. – Vol. 16. - № 12. – P. 961-963.

82. Shi L. Broadband  $Er^{3+}-Yb^{3+}$  co-doped superfluorescent fiber source/ L. Shi [et al.]//Optics Communications. – 2006. – Vol. 257. – No 2. – P. 270-276.

83. Wan H. Stabilization of a superfluorescent fiber source with high performance erbium doped fibers/ H. Wan, D. Zhang, X. Sun //Optical Fiber Technology. -2013. - Vol. 19. - No 3. - P. 264-268.

84. Fercher A.F. Optical coherence tomography-principles and applications/ A.F. Fercher [et al.] //Reports on progress in physics. – 2003. – Vol. 66. – № 2. – P. 239-303.

85. Schmitt J.M. Optical coherence tomography (OCT): a review/ J.M. Schmitt//IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. -1999. - Vol. 5. - N = 4. - P. 1205-1215.

86. Мамедов Д.С. Сверхширокий мощный суперлюминесцентный диод с длиной волны излучения 920 нм/ Д.С. Мамедов, В.В. Прохоров, С.Д. Якубович //Квантовая электроника. – 2003. - Т. 33. - № 6. – С. 511–514..

87. Bashkansky M. Characteristics of a Yb-doped superfluorescent fiber source for use in optical coherence tomography/ M. Bashkansky [et al.] //Optics Express. – 1998. - Vol. 3. - № 8. - P. 305-310.

88. Алейник А.С. Методы потсроения высокостабильных эрбиевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения/ А.С. Алейник [и др.]//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. - Т. 16. - № 4. - С. 593-607.

89. Hall D.C. High-stability  $Er^{3+}$ -doped superfluorescent fiber sources/ D.C. Hall, W.K. Burns, R.P. Moeller //Journal of lightwave technology. – 1995. – Vol. 13. –  $N_{2}$  7. – P. 1452-1460.

90. Li Y. Influence of Er-doped superfluorescent fiber source's spectrum-stability on the SNR of fiber optic gyroscopes/ Y. Li, Y. Sun, M. Jiang //Optik-International Journal for Light and Electron Optics. – 2014. – Vol. 125. - № 14. - P. 3718-3721.

91. Dimas C.E. Coherence Length Characteristics from Broadband Semiconductor Emitters: Superluminescent Diodes versus Broadband Laser Diodes/ C.E. Dimas [et al.] //Proc. of SPIE. – 2009. - Vol. 7230. - P. 72300B (8 pp.).

92. Digonnet M.J.F. Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers, revised and expanded - sec.ed. - New York: Marcel Dekker Inc., 2001. – 778 p.

93. Wang L.A. Stable and broadband Er-doped superfluorescent fiber sources using double-pass backward configuration/ L.A. Wang, C.D. Chen// Electronics letters. – 1996. - Vol. 32. - № 12. - P. 1815 – 1817.

94. Драницына Е.В. Исследование зависимости выходного сигнала волоконнооптического гироскопа от температуры в составе бескарданного инерциального измерительного модуля/ Е.В. Драницына, Д.А. Егоров //Навигация и управление движением. – 2012. - С. 447-452.

95. Jazi M.K. The evaluation of various designs for a C and L band superfluorescent source based erbium doped fiber/ M.K. Jazi [et al.] //Laser Physics. -2013. - Vol. 23. -  $N_{2}$  6. - P. 065104.

96. Chen H. Hybrid broadband superfluorescent fiber source consisting of both thuliumdoped fiber and erbium-doped fiber/ H. Chen, G.W. Schinn //Optics Communications. – 2004. - № 229. - P. 141–146.

97. Xiu-Lin W. Characteristics Improvement of L-Band Superfluorescent Fiber Source Using Unpumped Erbium-Doped Fiber/ W. Xiu-Lin, H. Wen-Cai, C. Zhi-Ping //Chinese Physics Letters. – 2012. – Vol. 29. – № 8. – P. 084213.

98. Jeong H. Characterization of broadband amplified spontaneous emission from an  $Er^{3+}-Tm^{3+}$  co-doped silica fiber/ H. Jeong [et al.] //Chemical Physics Letters. – 2003. – Vol. 367. – No 3-4. – P. 507-511.

99. Reddy A.A. Optical properties of highly  $\text{Er}^{3+}$ -doped sodium–aluminium–phosphate glasses for broadband 1.5 µm emission/ A.A. Reddy [et al.] //Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509. – No 9. – P. 4047-4052.

100. Marjanovic S. Characterization of new erbium-doped tellurite glasses and fibers/ S. Marjanovic [et al.] //Journal of Non-Crystalline Solids. – 2003. – Vol. 322. – № 1-3. – P. 311-318.

101. Hu Y. et al. Multi-mode pumped ase source using phosphate and tellurite glasses // U.S. Patent Application No. US20040109225A1. – 2004.

102. Philipps J.F. Spectroscopic and lasing properties of  $\text{Er}^{3+}$ : Yb<sup>3+</sup>-doped fluoride phosphate glasses/ J.F. Philipps [et al.]//Applied Physics B. – 2001. – Vol. 72. – No 4. – P. 399-405.

103. Rivera V.A.G. Waveguide produced by fiber on glass method using Er3+-doped tellurite glass/ V.A.G. Rivera [et al.] //Journal of non-crystalline solids.  $-2007. - Vol. 353. - N_{2} 4. - P. 339-343.$ 

104. Chillcce E.F. Ultra large amplification bandwidth of  $Er^{3+}$  and  $Tm^{3+}$  at S and L band from TeO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> glass doped optical fibers/ E.F. Chillcce [et al.] //Optical Components and Materials II. – International Society for Optics and Photonics, 2005. – Vol. 5723. – P. 243-247.

105. Nandi P. Superfluorescence from Yb-and Yb–Er-doped phosphotellurite glass fibres/ P. Nandi, G. Jose //Optical Fiber Technology. – 2008. – Vol. 14. – № 4. – P. 275-280.

106. Lousteau J.  $Er^{3+}$  and  $Ce^{3+}$  Codoped Tellurite Optical Fiber for Lasers and Amplifiers in the Near-Infrared Wavelength Region: Fabrication, Optical Characterization, and Prospects/ J. Lousteau [et al.] //IEEE Photonics Journal. – 2012. – Vol. 4. – No 1. – P. 194-204.

107. Lu Y.L. Fluorescence and attenuation properties of  $Er^{3+}$ -doped phosphate-glass fibers and efficient infrared-to-visible up-conversion/ Y.L. Lu, Y.Q. Lu, N.B. Ming //Applied Physics B. –1996. - Vol. 62. - No 3. – P. 287-291.

108. Song F. Compact high power broadband  $Er^{3+}-Yb^{3+}$  -codoped superfluorescent fiber source/ F. Song [et al.] //Applied Physics Letters. – 2008. - Vol. 93. - No 9. - P. 091108.

109. Wentao G. Theoretical study on erbium ytterbium co-doped super-fluorescent fiber source/ G. Wentao [et al.] //Journal of Semiconductors.  $-2016. - Vol. 37. - N \ge 1. - P. 014010.$ 

110. Курков А.С. Эрбиевые волоконно-оптические усилители/ А.С. Курков, О.Е. Наний //Lightwave russian edition. – 2003. - Т. 1. – С. 14-21.

111. Дианов Е.М. Методы сглаживания спектра усиления эрбиевых волоконных усилителей/ Е.М. Дианов [и др.]//Квантовая электроника. – 1996. - Т. 23 - № 12. - С. 1059-1064.

112. Хамида Б.А. Широкополосный усилитель с плоским распределением коэффициента усиления на основе волокон с высокой концентрацией эрбия в параллельной двухпроходной конфигурации/ Б.А. Хамида [и др.]//Квантовая электроника. – 2012. - Т. 42. - № 3. - С. 241-243.

113. Курков А.С. Мощный эрбиевый волоконный усилитель с накачкой от рамановского волоконного конвертера на основе фосфоросиликатного световода/ А.С. Курков [и др.]//Квантовая электроника. – 2001. - Т. 31. - № 9. - С. 801-803.

114. Крюков П. Г. Лазеры ультракоротких импульсов //Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – №. 2. – С. 95-119.

115. Голышев В.Ю. Аналитическая модель иттербий-эрбиевого волоконного усилителя в режиме насыщения/ В.Ю. Голышев //Журнал технической физики. - 2003. - Т. 73. - № 10. – С. 93-96.

116. Tang, N. 10 watt-level tunable narrow linewidth 1.5  $\mu$ m all-fiber amplifier/ N. Tang [et al.] //High Power Laser Science and Engineering. – 2018. - Vol. 6. - P. e33 (5 pp.).

117. Sobon G. Erbium–ytterbium co-doped fiber amplifier operating at 1550 nm with stimulated lasing at 1064 nm/ G. Sobon, P. Kaczmarek, K.M. Abramski //Optics Communications. – 2012. - Vol. 285. - № 7. - P. 1929-1933.

118. Moghaddam M.R.A. Experimental and theoretical studies on ytterbium sensitized erbium-doped fiber amplifier/ M.R.A. Moghaddam [et al.] //Optik-International Journal for Light and Electron Optics. – 2011. - Vol. 122. - № 20. - P. 1783-1786.

119. Yahel E. Transient analysis of short, high-concentration, gain-clamped  $Er^{3+}$ -Yb<sup>3+</sup>codoped fiber amplifiers/ E. Yahel, O. Hess, A.A. Hardy //Journal of lightwave technology. – 2006. - Vol. 24. - No 5. - P. 2190-2198.

120. Jasapara J.C. Picosecond pulse amplification in a core-pumped large-mode-area erbium fiber/ J.C. Jasapara [et al.]//Optics letters. – 2007. - Vol. 32. - № 16. - P. 2429-2431.

121. Sobon G. Er/Yb co-doped fiber amplifier with wavelength-tuned Yb-band ring resonator / G. Sobon [et al.]//Optics Communications. – 2012. - Vol. 258. - № 18. - P. 3816-3819.

122. Hattori K. Optical amplification in Er3+-doped P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–SiO<sub>2</sub> planar waveguides/ K. Hattori [et al.]//Journal of applied physics. – 1996. - Vol. 80. - № 9. - P. 5301-5308.

123. Jagerska J. Er–Yb waveguide amplifiers in novel silicate glasses/ J. Jagerska [et al.]//IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2008. - Vol. 44. - № 6. - P. 536-541.

124. Shooshtari A. Ion-exchanged Er/Yb phosphate glass waveguide amplifiers and lasers/ A. Shooshtari [et al.] // Optical Engineering. - 1998. – Vol. 37.- № 4. – P. 1188-1192.

125. Yan Y.C. Erbium-doped phosphate glass waveguide on silicon with 4.1 dB/cm gain at 1.535 μm/ Y.C. Yan [et al.]// Applied Physics Letters. – 1997. - Vol. 20. - № 71. - P. 2922-2924.

126. Scarpignato G.C. Fabrication and Characterization of a High-Gain Yb-Er Codoped Phosphate Glass Optical Amplifier/ G.C. Scarpignato [et al.] //Journal of Engineering. – 2013. – ID 858341.

127. Spiegelberg C. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003)/ C. Spiegelberg [et al.]//Journal of Lightwave Technology. -2004. - Vol. 22. - No 1. - P. 57-62.

128. Boetti N. G. et al. High concentration Yb-Er co-doped phosphate glass for optical fiber amplification//Journal of Optics. -2015. -Vol. 17.  $-N_{2}$  6. -P. 065705.

129. Xu S. H. et al. An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5  $\mu$ m //Optics Express. – 2010. – Vol. 18. – No 2. – P. 1249-1254.

130. Shi W. et al. High SBS-threshold single-mode single-frequency monolithic pulsed fiber laser in the C-band //Optics Express. -2009. - Vol. 17. - No 10. - P. 8237-8245.

131. Shi W. et al. Kilowatt-level stimulated-Brillouin-scattering-threshold monolithic transform-limited 100 ns pulsed fiber laser at 1530 nm //Optics letters. -2010. - Vol. 35.  $- N_{2} 14. - P. 2418-2420.$ 

132. Petersen E. et al. High peak-power single-frequency pulses using multiple stage, large core phosphate fibers and preshaped pulses //Applied optics. -2012. -Vol. 51.  $-N_{2} 5$ . -P. 531-534.

133. Shi W. et al. Power scaling for narrow linewidth C-band pulsed fiber lasers using a highly Er/Yb co-doped phosphate glass fiber //Optical Components and Materials V. – 2008. – Vol. 6890. – P. 68900K (7 pp.).

134. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics/ G.P. Agrawal - 3rd ed. - New York: Academic Press, 2001. - 467 p.

135. Chavez-Pirson A. et al. Sub-picosecond pulse amplification in a short length, highly doped erbium/ytterbium phosphate fiber amplifier //Optical Amplifiers and Their Applications. – Optical Society of America, 2006. – P. OMC3.

136. Peng X. et al. High efficiency, monolithic fiber chirped pulse amplification system for high energy femtosecond pulse generation //Optics express. -2013. - Vol. 21. - No 21. - P. 25440-25451.

137. Polynkin P. et al. All-Fiber Picosecond Laser System at 1.5  $\mu$ m Based on Amplification in Short and Heavily Doped Phosphate-Glass Fiber //IEEE photonics technology letters. – 2006. – Vol. 18. – Nº 21. – P. 2194-2196.

138. Fu S. et al. Review of recent progress on single-frequency fiber lasers //JOSA B. – 2017. – Vol. 34. –  $N_{2}$  3. – P. 49-62.

139. Fu Z. H. et al. Single-frequency linear cavity erbium-doped fiber laser for fiberoptic sensing applications //Laser Physics Letters.  $-2009. - Vol. 6. - N_{2} 8. - P. 594-$ 597.

140. Курков А. С. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства/ Семенцов Д.И., Журавлев В.М. – Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2012. – 184 с.

141. Li Q. et al. Narrow linewidth, linear cavity, erbium-doped fiber laser with saturable absorber //2012 International Conference on Computer Science and Information Processing (CSIP). – IEEE, 2012. – P. 275-277.

142. Młyńczak J. et al. Comparison of cw laser generation in  $Er^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$ : glass microchip lasers with different types of glasses //Opto-Electronics Review. – 2011. – Vol. 19. – Nº 4. – P. 491-495.

143. Honkanen S. et al. Waveguide lasers in phosphate glasses made using UV-written gratings [Electronic source] /SPIE Newsroom. - SPIE, The international society for optics and photonics, 2008. – URL: https://spie.org/news/0998-waveguide-lasers-in-phosphate-glasses-made-using-uv-written-gratings (accessed date: 07.12.2020)

144. Claesson Å. et al. Novel Er: Yb phosphate glass fiber laser pumped by a 946 nm Nd: YAG laser //Conference on Lasers and Electro-Optics. – Optical Society of America, 2001. – P. CWA56.

145. Qiu T. et al. Generation of watt-level single-longitudinal-mode output from cladding-pumped short fiber lasers //Optics letters. -2005. - Vol. 30. - No 20. - P. 2748-2750.

146. Polynkin P. et al. Single-frequency laser oscillator with watts-level output power at 1.5  $\mu$ m by use of a twisted-mode technique //Optics letters. – 2005. – Vol. 30. – No 20. – P. 2745-2747.

147. Schülzgen A. et al. Single-frequency fiber oscillator with watt-level output power using photonic crystal phosphate glass fiber //Optics Express.  $-2006. - Vol. 14. - N_{\rm D} 16. - P. 7087-7092.$ 

148. Hofmann P. et al. 550-mW output power from a narrow linewidth all-phosphate fiber laser //Journal of lightwave technology. – 2012. – Vol. 31. – № 5. – P. 756-760.

149. Wang L. et al. Yb/Er co-doped phosphate all-solid single-mode photonic crystal fiber //Scientific reports. -2014. - Vol. 4. - No 1. - P. 6139 1-3.

150. Wu R. et al. Short-length high-gain ASE fiber laser at 1.54-μm by high-codoped erbium and ytterbium phosphate laser glasses //Fiber Lasers: Technology, Systems, and Applications. – International Society for Optics and Photonics, 2004. – Vol. 5335. – P. 64-72.

151. Дворецкий Д.А. и др. Особенности генерации стабильных ультракоротких импульсов в полностью волоконном кольцевом эрбиевом лазере с высоконелинейным резонатором //Лазеры в науке, технике, медицине. – 2017. – С. 14-18.

152. Byun H. et al. Compact, stable 1 GHz femtosecond Er-doped fiber lasers //Applied Optics.  $-2010. - Vol. 49. - N_{2} 29. - P. 5577-5582.$ 

153. Chong A., Wright L. G., Wise F. W. Ultrafast fiber lasers based on self-similar pulse evolution: a review of current progress //Reports on Progress in Physics.  $-2015. - Vol. 78. - N_{2} 11. - P. 113901.$ 

154. Воропаев В. С. и др. Генерация фемтосекундных импульсов в полностью волоконном кольцевом эрбиевом лазере с синхронизацией мод на основе эффекта Керра для терагерцовой импульсной спектроскопии// Машиностроение и компьютерные технологии. – 2015. – № 5. – С. 319-333.

155. Sobon G. All-polarization maintaining femtosecond Er-doped fiber laser modelocked by graphene saturable absorber/ G. Sobon, J. Sotor, K.M. Abramski //Laser Physics Letters. -2012. -Vol. 9.  $-N_{2} 8$ . -C. 581-586.

156. Гнатенко А. С. и др. Обеспечение синхронизации мод в волоконных кольцевых лазерах// Journal of Nano- and Electronic Physics – 2018. – Vol. 10. - № 2. – С. 02033 (1-8).

157. Yamashita S. et al. 5-GHz pulsed fiber Fabry-Perot laser mode-locked using carbon nanotubes //IEEE Photonics Technology Letters.  $-2005. - Vol. 17. - N_{2} 4. - P. 750-752.$ 

158. Panasenko D. et al. Er-Yb femtosecond ring fiber oscillator with 1.1-W average power and GHz repetition rates //IEEE Photonics Technology Letters.  $-2006. - Vol. 18. - N_{2} 7. - P. 853-855.$ 

159. Галаган Б. И. и др. Широкополосный волоконный источник инфракрасного излучения на основе высоколегированного Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> композитного оптического волокна с накачкой в оболочку //Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3. – №. 2. – С. 146-157.

160. Karlsson G. et al. Development and characterization of Yb-Er laser glass for high average power laser diode pumping //Applied Physics B. -2002. - Vol. 75. - No 1. - P. 41-46.

161. ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013 Волокна оптические. Часть 1-44. Методы измерений и проведение испытаний. Длина волны отсечки. - введ. 2015-01-01. - М.: Стандартинформ, 2014. – 18 с. - (Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии.)

162. Bubnov M. M. et al. Optical properties of fibres with aluminophosphosilicate glass cores //Quantum Electronics.  $-2009. - Vol. 39. - N_{2} 9. - P. 857-862.$ 

163. Denker B.I. Up-conversion losses in different erbium-doped laser glasses/ B.I. Denker, B.I. Galagan, S.E. Sverchkov //Applied Physics B. -2015. - Vol. 120. - No 2. - P. 367-372.

164. Aramaki S. Revised phase diagram for the system  $Al_2O_3$ — $SiO_2$ / S. Aramaki, R. Roy //Journal of the American Ceramic Society. – 1962. – Vol. 45. – No 5. – P. 229-242.

165. DiGiovanni D.J. Structure and properties of silica containing aluminum and phosphorus near the AlPO<sub>4</sub> join/ D.J. DiGiovanni, J.B. MacChesney, T.Y. Kometani //Journal of Non-Crystalline Solids. – 1989. – Vol. 113. –  $\mathbb{N}_{2}$  1. – P. 58-64.

166. Vienne G.G. et al. Fabrication and characterization of  $Yb^{3+}$ :  $Er^{3+}$  phosphosilicate fibers for lasers //Journal of lightwave technology. – 1998. – Vol. 16. –  $N_{2}$  11. – P. 1990.

167. ГОСТ Р МЭК 793-1-93 Волокна оптические. Общие технические требования. - введ. 1995-01-01. - М.: Издательство стандартов, 1993. – 108 с.

168. ГОСТ Р МЭК 60793-1-40-2012 Волокна оптические. Часть 1-40. Методы измерений и проведение испытаний. Затухание. - введ. 2013-07-01. - М.: Стандартинформ, 2014. - 20 с. - (Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии.)

169. Алышев С.В. Волоконные световоды на основе кварцевого стекла, легированного висмутом или теллуром, - лазерные среды для спектральной области 1550-1800 нм: дис. ... канд. физ.-мат. наук / С.В. Алышев– М., 2016. – 123 с.

170. Ohtsuki T. et al. Cooperative upconversion effects on the performance of Er 3+doped phosphate glass waveguide amplifiers //JOSA B. – 1997. – Vol. 14. –  $N_{2}$  7. – P. 1838-1845.

171. Boetti N.G. et al. Spectroscopic investigation of  $Nd^{3+}$  single doped and  $Eu^{3+}/Nd^{3+}$  co-doped phosphate glass for solar pumped lasers //Journal of non-crystalline solids. – 2013. – Vol. 377. – P. 100-104.

172. Hui F. et al. Investigation on near Gaussian-shaped spectrum erbium-doped fiber source which applied to the fiber optic gyroscope //2017 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). – IEEE, 2017. – P. 1-4.

173. Рупасов А.В. Исследование метода локального температурного воздействия и его применение для компенсации дрейфа волоконно-оптического гироскопа: дисс. .. к.т.н./А.В. Рупасов. - СПб, 2014. – 135 с.

174. Su H. C., Wang L. A. A highly efficient polarized superfluorescent fiber source for fiber-optic gyroscope applications/ //IEEE Photonics Technology Letters. -2003. -Vol. 15.  $- N_{2}$  10. - P. 1357-1359.

175. Wagener J.L. A high-stability fiber amplifier source for the fiber optic gyroscope/ J.L. Wagener, M.J.F. Digonnet, H.J. Shaw //Journal of lightwave technology. -1997. -Vol. 15.  $- N_{2} 9. - P. 1689-1694.$ 

176. Li W. et al. Superluminescent diodes at 1.55  $\mu$ m based on quantum-well and quantum-dot active regions //Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications IX. – International Society for Optics and Photonics, 2005. – Vol. 5739. – P. 116-121.

177. Филатов Ю.В. Волоконно-оптический гироскоп: учеб. пособие. - СПб.: Издво СПбГЭТУ - ЛЭТИ, 2003. – 54 с.

178. Cutler C. C., Newton S. A., Shaw H. J. Limitation of rotation sensing by scattering //Optics Letters. – 1980. – Vol. 5. – № 11. – P. 488-490.

179. Morkel P.R. Noise characteristics of high-power doped-fibre superluminescent sources/ P.R. Morkel, R.I. Laming, D.N. Payne //Electronics Letters. – 1990. - Vol. 26. - № 2. - P. 96-98.

180. Ильченко С.Н. Суперлюминесцентные диоды и полупроводниковый оптический усилитель повышенной мощности и широкополосности и приборы на их основе: дисс...к.т.н./ С.Н. Ильченко - М., 2014. – 138 с.

181. Рябухо В.П. Сканирующий низкокогерентный интерферометр Майкельсона с цифровой обработкой сигнала: Учебно-методическое руководство к выполнению лабораторной работы/ В.П. Рябухо, В.В. Лычагов, Д.В. Лякин - Саратов, 2009. – 49 с.

182. Wang W. The influence of Er-doped fiber source under irradiation on fiber optic gyro/ W. Wang, X. Wang, J. Xia //Optical Fiber Technology. – 2012. – Vol. 18. – № 1. – P. 39-43.

183. Man W.S. et al. Design of fiber Bragg grating for flattening of superfluorescent fiber source (SFS) using computer simulation //Computer physics communications. –  $2001. - Vol. 142. - N_{2} 1-3. - P. 270-273.$ 

184. Brady G.P. et al. Extended-range, low coherence dual wavelength interferometry using a superfluorescent fibre source and chirped fibre Bragg gratings //Optics communications.  $-1997. - Vol. 134. - N_{2} 1-6. - P. 341-348.$ 

185. Zeilinger A. General properties of lossless beam splitters in interferometry // American Journal of Physics. – 1981. – Vol. 49. – № 9. – P. 882-883.

186. Поносова А.А. и др. Широкополосный волоконный эрбиевый источник//Фотон-экспресс. - 2015. - Т. 6. - № 126. – С. 91-92.

187. Tsukitani M. et al. Ultra low nonlinearity pure-silica-core fiber with an effective area of 211  $\mu$ m<sup>2</sup> and transmission loss of 0.159 dB/km //2002 28TH European Conference on Optical Communication. – Copenhagen, Denmark, 2002. – Vol. 2. – C. 1-2.

188. Erbium-Doped Fiber Amplifier Education Kit Manual [Electronic source] -<br/>Amonics Ltd., 3 November 2004. - URL:<br/><br/>https://m.tau.ac.il/~lab3/OPTICOM/EDFA\_Kit\_upgrade\_manual.pdf(accessed date:<br/>16.01.2020).

189. Baney D. M., Gallion P., Tucker R. S. Theory and measurement techniques for the noise figure of optical amplifiers/ D.M. Baney, P. Gallion, R.S. Tucker //Optical fiber technology.  $-2000. - Vol. 6. - N \ge 2. - P. 122-154.$ 

190. Trikshev A. I., Kamynin V. A., Tsvetkov V. B. Passively harmonic mode-locked erbium fiber laser //2018 International Conference Laser Optics (ICLO). – St. Petersburg, 2018. – P. 63-63.

191. Голышев В.Ю. и др. Фазовая самомодуляция излучения в волоконнооптических линиях связи //Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36. – № 10. – С. 946-950.

192. Турицын С. К. и др. Диссипативные солитоны в волоконных лазерах //Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186. – № 7. – С. 713-742.

193. Яшунин Д.А. Фемтосекундная оптика (электронное пособие): Учебнометодическое пособие/ Д.А. Яшунин, Ю.А. Мальков, С.Б. Бодров. - Нижний Новгород: Изд-во НГУ им. Лобачевского, 2014. – 40 с.

194. Lazaridis P. Time-bandwidth product of chirped sech<sup>2</sup> pulses: application to phase-amplitude-coupling factor measurement/ P. Lazaridis, G. Debarge, P. Gallion //Optics letters. – 1995. – Vol. 20. –  $N_{2}$  10. – P. 1160-1162.

195. Зейтунян А. С. и др. Диагностика фемтосекундных лазерных импульсов на основе генерации нелинейно-дисперсионного симиляритона// Известия НАН Армении. Физика. – 2010. – Т. 45. - № 4. - С. 260-264.

196. Kelly S.M.J. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton //Electronics Letters. – 1992. – Vol. 28. – № 8. – P. 806-807.

197. Nelson L.E. et al. Ultrashort-pulse fiber ring lasers //Applied Physics B: Lasers & Optics. – 1997. – Vol. 65. –  $N_{2}$  2. – C. 277-294.

198. Yang C. Y. et al. Pulse-width saturation and Kelly-sideband shift in a graphenenanosheet mode-locked fiber laser with weak negative dispersion //Physical Review Applied. -2015. -Vol. 3.  $-N_{2} 4$ . -P. 044016.

199. Tang D.Y. et al. Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers //Physical Review A. -2005. - Vol. 72.  $- N_{2} 4$ . - P. 043816.

200. Bonifacio R. Cooperative radiation processes in two-level systems: Superfluorescence/ R. Bonifacio, L.A. Lugiato //Physical Review A. – 1975. – Vol. 11. –  $N_{2}$  5. – P. 1507.