

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
Кафедра лазерных систем и структурированных материалов

Направление подготовки / специальность: 03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки: Физика и астрономия

ЭРБИЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ПОВЫШЕННЫМ ПОРОГОМ ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА

(научный доклад об основных результатах подготовленной научноквалификационной работы
(диссертации))

Аспирант:

Худяков Максим Маратович

(подпись аспиранта)

Научный руководитель:

Лихачев Михаил Евгеньевич,
канд. физ.-мат. наук

(подпись научного руководителя)

Консультант (при наличии):

(подпись консультанта)

Москва 2021

Работа прошла апробацию на кафедре информатики и вычислительной математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Лихачёв Михаил Евгеньевич

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, заведующий
лабораторией специальных волоконных
световодов научного центра волоконной оптики
им. Е.М. Дианова при институте общей физики
им. А.М. Прохорова РАН

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Излучение с длиной волны больше 1,4 мкм имеет высокое поглощение молекулами воды. Это приводит к тому, что большая доля мощности такого излучения поглощается роговицей глаза и не достигает чувствительной сетчатки [1]. Таким образом оно является безопасным для глаз и подходит для атмосферных применений. В большинстве атмосферных применений требуется малая расходимость пучка излучения для увеличения дальности измерения/передачи. Волоконные лазеры (ВЛ) и усилители (ВУ) позволяют получить дифракционно-ограниченное качество выходного излучения. Они имеют большое отношение площади поверхности к объёму, что ускоряет теплоотдачу от активной среды. Таким образом возможно создание лазеров с большой средней мощностью без принудительного охлаждения. Другими достоинствами ВЛ являются их высокий КПД, устойчивость к механическим воздействиям, компактность и малый вес. Так же, для спектрального диапазона вблизи 1,55 мкм существует большая компонентная база из-за его широкого применения в оптоволоконных телекоммуникационных системах.

Таким образом, ВЛ и ВУ в спектральном диапазоне вблизи 1,55 мкм хорошо подходят для решения задач, требующих распространения излучения через атмосферу. К таким задачам относятся дистанционное измерение скорости ветра при помощи доплеровского LIDAR-a (Light Detection and Ranging «обнаружение и определение дальности с помощью света») и измерение концентрации CO₂ в газовом столбе. Кроме высокого качества пучка и безопасности для глаз здесь требуется малая спектральная ширина линии излучения и большая энергия импульса излучения. В то же время, увеличение пространственного разрешения в системах для решения таких задач достигается уменьшением длительности

импульса до сотен нс, что приводит к росту пиковой мощности и возникновению нелинейных эффектов в ВЛ. Нелинейный эффект с наименьшим порогом в таких условиях является вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ).

Наиболее широко применяемые волоконные источники излучения в спектральной области 1,55 мкм созданы на основе волоконных световодов (ВС), легированными оксидом эрбия. Достижение высокой пиковой мощности и эффективности в таких ВЛ и ВУ затруднено низким сечением поглощения накачки и эффектом кооперативной апконверсии в ионах эрбия, вызванной их кластеризацией. Кластеризации ионов эрбия ограничивает максимальную концентрацию, что в совокупности с малым сечением поглощения накачки приводит к сравнительно большим длинам активного ВС необходимым для полного поглощения накачки. Таким образом увеличение пиковой мощности в эрбиевых ВУ (ЭВУ) возможно только за счёт уменьшения эффективности.

Для решения проблемы малого сечения поглощения накачки в сердцевину эрбиевого ВС (ЭВС) добавляют оксид иттербия. Ионы иттербия имеют на порядок большее сечение поглощения накачки и не подвержены эффекту кооперативной апконверсии (если не считать фотопотемнения). Так же лазерный уровень иттербия ${}^2F_{5/2}$ обладает сравнимой энергией с уровнем ${}^4I_{11/2}$ эрбия, что позволяет происходить передачи возбуждения от ионов иттербия к близлежащим ионам эрбия. Большое поглощение накачки приводит к меньшей длине активного ВС и потенциально большей пиковой мощности. Однако в таких эрбий-иттербиевых ВУ (ЭИВУ) низкая эффективность передачи возбуждения (ЭПВ) от ионов иттербия к ионам эрбия приводит к паразитной генерации ионами иттербия излучения в опасной для глаз спектральной области вблизи 1 мкм. Данный эффект является пороговым (как и любая лазерная генерация) и ограничивает максимальную выходную мощность ЭИВУ. В связи с этим, проблема создания

ВУ с большой пиковой мощностью и одновременно большой эффективностью остаётся не решённой.

Важно отметить, что в полностью волоконных приборах используются пассивные ВС и компоненты на их основе после ВУ для доставки излучения. Это приводит к дополнительной нелинейности, связанной с распространением излучения с высокой пиковой мощностью по таким ВС. В связи с этим разработка пассивных ВС с повышенным порогом нелинейных эффектов (в частности ВРМБ) является актуальной задачей для увеличения пиковой мощности ВУ.

Целью данной работы является исследование способов повышения пиковой мощности и эффективности волоконных усилителей для спектрально ограниченных наносекундных импульсов в спектральной области вблизи 1,55 мкм.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние фтор-германо-алюмо-силикатной матрицы сердцевины эрбиевого волоконного световода на эффективность усиления и максимальную пиковую мощность для спектрально ограниченных наносекундных импульсов.
2. Изучить механизм повышения пиковой мощности эрбиевого волоконного световода с накачкой по оболочке путём увеличения диаметра световода по его длине .
3. Исследовать возможность повышения эффективности усиления эрбиевого волоконного световода с накачкой по оболочке путём увеличения соотношения диаметров сердцевины и оболочки.
4. Разработать и исследовать одномодовый эрбий-иттербиевый волоконного световода с увеличенной площадью поля моды, накачкой по оболочке и большой эффективностью усиления.

5. Исследовать новые подходы к созданию высокоэффективных волоконных усилителей с высокой пиковой мощностью.
6. Исследовать методы повышения порога вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в пассивных волоконных световодах.

Научная новизна работы:

1. Впервые изучена новая фтор-германий-алюмосиликатная (ФГАС) матрица стекла сердцевины ВС с большой концентрацией алюминия и фтора. Показано, что использование этой матрицы позволяет обеспечить максимальную эффективность работы ЭВС при накачке в оболочку на длине волны 976 нм, а также при работе в длинноволновой области (L-диапазон). Показано, что одновременное использование двух типов ЭВС с разной матрицей стекла сердцевины в одном усилителе позволяет повысить порог ВРМБ при неизменной эффективности по сравнению с ВУ, состоящим только из одного типа ЭВС.
2. Впервые показано, что использование эрбиего и эрбий-иттербиего ВС (ЭИВС) в одном комбинированном усилителе позволяет объединить достоинства этих типов ВС – высокий коэффициент усиления в ЭВС и высокую эффективность преобразования излучения накачки в сигнальное излучение в ЭИВС.
3. Впервые показано, что для оптически одномодовых пассивных ВС наибольшей степени подавления ВРМБ возможно достичь, сформировав многомодовый акустический волноведущий профиль, полученный совместным легированием оксидами алюминия и германия. При этом различная комбинация концентраций оксидов германия и алюминия позволяет менять акустический ППП и оставлять неизменным оптический ППП.

Практическая значимость работы:

1. Проведено исследование влияния длины волны накачки (976 нм и 981 нм) на эффективность ЭВС с накачкой по оболочке для алюмофосфоросиликатной (АФС) матрицы стекла сердцевины. Показано, что оптимальным является использование накачки с центральной длиной волны 981 нм. Такая накачка позволяет достичь максимально возможную эффективность и/или пиковую мощность при усилении импульсного излучения в коротковолновой области (С-диапазон). Продемонстрирована рекордно высокая пиковая мощность для полностью волоконных усилителей наносекундной импульсов. Разработанный ЭВУ может быть использован как источник [2], что позволяет получить мощное излучение на длине волны 3,5 мкм, лежащей за окном прозрачности кварцевого стекла.
2. Экспериментально продемонстрирована возможность повышения эффективности ЭВС до 48,7 % для излучения на длине волны 1565 нм (41,5 % для 1535 нм) при повышении соотношения диаметра многомодовой сердцевины к диаметру оболочки до 0,76. Полученная эффективность является максимальной на сегодняшний день для эрбиевых (без иттербия) ВУ с накачкой по оболочке на 976 нм. Такой ЭВУ обладает большей яркостью и лучшей масштабируемостью средней мощности по сравнению с диодными накачками в этом спектральном диапазоне.
3. Был разработан ряд конструкции ВУ, позволяющих получить одномодовые спектрально ограниченные наносекундные импульсы с высокой пиковой мощностью в спектральной области вблизи 1,55 мкм. Продемонстрирована рекордно высокая пиковая мощность 20 кВт с использованием ЭВС с увеличивающимся по его длине диаметром поля моды до 53,4 мкм. Разработанная конструкция комбинированного усилителя позволила получить рекордную эффективность 23,6 % для полностью волоконных

усилителей таких импульсов с пиковой мощностью более 3,7 кВт. Эти конструкции ВУ могут быть использованы для повышения дальности сканирования доплеровских LIDAR-ов.

Защищаемые положения:

1. Оптимальная длина накачки для ЭВС с АФС матрицей стекла сердцевины является 981 нм. Использование такой накачки позволяет получить рекордно высокую пиковую мощность для полностью волоконных усилителей наносекундной импульсов.
2. Одновременное использование двух типов ЭВС (АФС и ФГАС) в одном усилителе позволяет повысить порог ВРМБ при неизменной эффективности по сравнению с ВУ, состоящим только из одного типа ЭВС.
3. Увеличение соотношения диаметра многомодовой сердцевины к диаметру оболочки до 0,76 в ЭВС позволяет получить максимальной на сегодняшний день эффективность для эрбиевых (без иттербия) ВУ с накачкой по оболочке на 976 нм – 48,7 %.
4. Использование конической геометрии ЭВС с увеличивающимся по длине диаметром позволяет получить выходное излучение с диаметром поля моды более чем в пять раз превышающим диаметр поля моды в стандартных телекоммуникационных ВС - 53,4 мкм и качеством пучка близким к дифракционно ограниченному (параметр $M^2 = 1,26$). Так же такая геометрия приводит к увеличению порога ВРМБ до величины, превышающей 20 кВт.
5. Полностью волоконный комбинированный эрбий/эрбий-иттербиевый ВУ позволяет объединить высокий коэффициент усиления в ЭВС и высокую эффективность преобразования излучения накачки в сигнальное излучение в ЭИВС. Такая конструкция ВУ позволяет получить рекордную на момент написания диссертации эффективность преобразования накачки в сигнал 23,6% для усиления спектрально ограниченных наносекундных импульсов до пиковой мощности более 3,7 кВт в полностью волоконных ВУ.

б. Многомодовый волноводный акустический профиль, полученный совместным легированием оксидами алюминия и германия, позволяет достичь наибольшей степени подавления ВРМБ в оптически одномодовых ВС на 6,4 дБ для ВС с увеличенной апертурой сердцевины ($NA=0,24$) и на 4,8 дБ для ВС с уменьшенной апертурой сердцевины ($NA=0,075$) по сравнению с ВС с равномерным легированием по радиусу

Апробация работы

Результаты работы доложены на 16 докладах на международных конференциях: SPIE Photonics West 2017, 2018, 2019, CLEO\Europe 2017,2019, ICLO 2018, SOF 2020, ASSL 2019, Photoptics 2018, AFL 2019 и 7 докладах на всероссийских конференциях: Всероссийская конференция по волоконной оптике 2015,2017,2019, Российский семинар по волоконным лазерам 2016, 2018, 2020, а так же на семинарах НЦВО РАН.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 96 наименований.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 журнальных статьях, рекомендованных ВАК и в 23 тезисах докладов конференций.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приводится обзор литературных данных по теме диссертации, анализируются ключевые результаты в области тематики исследований данной работы. Выявляется недостаточная проработанность области исследований данной работы.

Во **второй главе** описываются способы повышения эффективности и/или пиковой мощности в ЭВС с накачкой по оболочке. В **параграфе 2.1** приведены результаты исследования зависимости эффективности ЭВУ от состава матрицы стекла сердцевины и длины волны накачки.

Коллегами автора была разработана технология производства заготовок методом MCVD (modified chemical vapor deposition - модифицированное осаждение из парогазовой фазы) с алюмосиликатной матрицей, сильно легированной фтором [3], которая позволила увеличить концентрация алюминия в два раза по сравнению с [4]. Таким образом, матрица стекла сердцевины состояла из 3 мол.% Al_2O_3 и 1,5 вес.% F. Для уменьшения серых потерь так же было добавлено 0,6 мол.% GeO_2 . Числовая апертура сердцевины таких заготовок составляла $\sim 0,055$. Была создана серия заготовок с разной концентрацией эрбия. Диаметр поля моды ЭВС, вытянутых из данных заготовок, составляет ~ 28 мкм. Для исследования зависимости от состава сердцевины был использован АФС аналогичный использованному в [5].

На рисунке 1 представлены спектры поглощения слабого сигнала сердцевиной таких ЭВС, нормированные по пику поглощения вблизи 1535 нм. Видно, что пик поглощения в области 0,98 мкм выше в ФГАС в 1,3 раза чем в

АФС. Так же, пик поглощения в ФГАС расположен на 976 нм по сравнению с 981 нм для АФС. Это приводит к в 1,2 раза большей эффективности ЭВУ с ФГАС матрицей при накачке на 976 нм независимо от длины волны сигнала. Однако при накачке на 981 нм АФС имеет в 1,5 раза большую эффективность, чем при накачке на 976 нм при длине волны сигнала 1557 нм, что превышает эффективность ФГАС для такой же длины волны сигнала. Однако разница в максимальных эффективностях не превышает 20-25 %, что при учёте сравнимых оптимальных длин позволяет считать такие ЭВС взаимозаменяемыми.

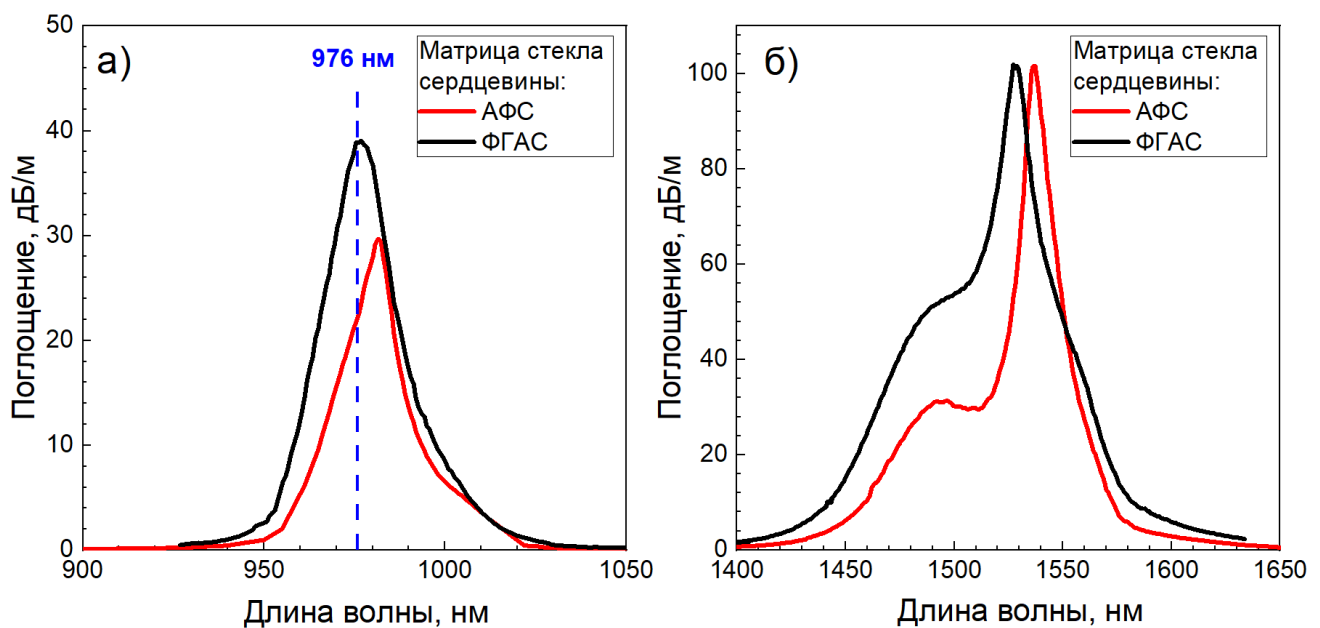


Рисунок 1. Поглощение слабого сигнала сердцевинной исследуемых ЭВС в области а) 0,98 мкм и б) 1,53 мкм

Взаимозаменяемость означает, что можно заменить половину длины ЭВС в ВУ на ЭВС с другой матрицей без значительного падения эффективности ВУ. Так как разная матрица сердцевинной приводит к разной резонансной частоте ВРМБ. Таким образом эффективная нелинейная длина ВУ уменьшается в 2 раза. Для проверки этого предположения было проведено сравнение порога ВРМБ в трёх ЭВУ с одинаковой суммарной длиной: АФС ЭВУ, ФГАС ЭВУ и ЭВУ, состоящим из 1,5 м ФГАС и 1,1 м ФАС. Из рисунка 2 видно, что эффективность всех ЭВУ практически одинакова, в то время как порог ВРМБ оказывается равным 1 и

1,2 кВт для ФГАС и АФС соответственно и 1,8 кВт для составного ЭВУ. Таким образом, использование ЭВС с разными матрицами в одном ЭВУ позволило повысить порог ВРМБ в 1,5 раза без потери эффективности.

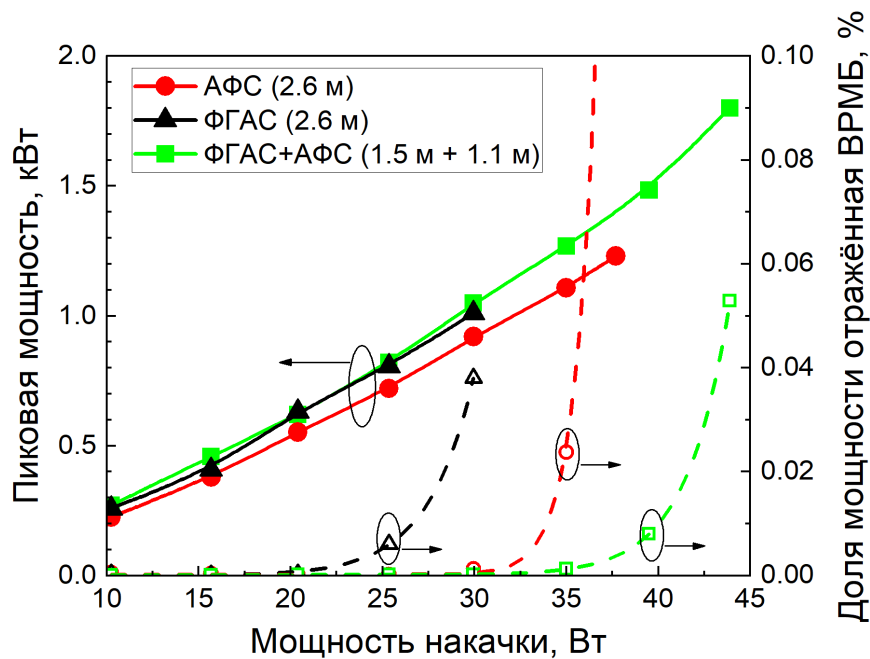


Рисунок 2. Зависимость пиковой мощности (слева, сплошные кривые) и доли мощности отражённой ВРМБ (справа, штриховые кривые) от мощности накачки в разных ЭВУ.

В параграфе 2.2 описываются результаты увеличения эффективности ЭВУ при увеличении соотношения диаметров сердцевины и оболочки. Это приводит к повышению поглощения накачки в схемах ЭВУ с накачкой по оболочке и позволяет уменьшать концентрацию эрбия без увеличения оптимальной длины ЭВС, что приводит к уменьшению кластеризации и росту эффективности. Сердцевины исследуемого ЭВС была многомодовой и имела диаметр 95 мкм при внешнем диаметре 125 мкм.

На основе данного ЭВС был создан ЭВУ с накачкой по оболочке в котором продемонстрировано усиление сигнала на длине волны 1565 нм с 0,5 Вт до 37 Вт с дифференциальной эффективностью 48,7% (41,5% для 1535 нм). Продemonстрированная эффективность 48,7% является рекордной для ВС,

легированный только эрбием без иттербия с накачкой на 980 нм. Учитывая электрооптическую эффективность диодов накачки (50%), электрооптическая эффективность полученного ЭВУ составила 17-24%, что совпадает с эффективностью коммерчески доступных ММ диодов для данной спектральной области.

Было проведено измерение распределения выходной мощности сигнала по числовой апертуре. Яркость разработанного ЭВУ превышает яркость коммерческого диода накачки с наименьшей доступной числовой апертурой 0,15. Это, в купе с более просто масштабируемостью выходной мощности и простотой стабилизации длины волны излучения волоконными брэгговскими решётками делает такой ЭВУ конкурентно способной заменой лазерным диодам в данном спектральном диапазоне, используемым в качестве источников накачки в полосу поглощения эрбия на 1535 нм [6] и для накачки тулиевых ВУ [7].

В **параграфе 2.3** приводятся результаты исследования метода повышения пиковой мощности путём увеличения площади поля моды. Идея подхода заключается в использовании в ВС с монотонно увеличивающимся в несколько раз диаметром по длине. Фундаментальная мода, возбуждённая в тонком конце такого ВС, где малый размер сердцевины обеспечивает её одномодовость, распространяется к толстому одномодовому концу без перекачки энергии в моды высшего порядка. Такой процесс возможен только при адиабатическом изменении диаметра ВС [8].

Распределение внешнего диаметра по длине для одного из таких ВС представлено на рисунке 3. Максимальный внешний диаметр составил 350 мкм, диаметр сердцевины 86 мкм. Расчётный диаметр поля фундаментальной моды составил 53,4 мкм (площадь поля моды ~ 2240 мкм²) на длине волны 1550 мкм. Для проверки адиабатичности режима распространения излучения по конусному ВС был измерен параметр качества пучка M^2 в конусном ВС, работающем в режим

ВУ непрерывного сигнала, при помощи системы измерения Thorlabs M2MS-VR209IR2/M. M^2 составил 1,26/1,27 для x и y осей соответственно, что говорит об отсутствии перекачки энергии из фундаментальной моды в моды высшего порядка.

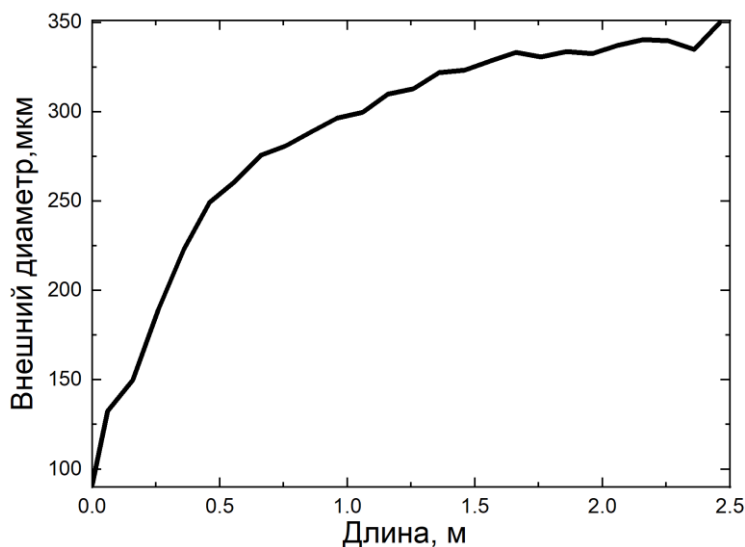


Рисунок 3. Зависимость внешнего диаметра от длины конусного ЭВС.

До 45 Вт накачки было введено в толстый торец, полированный под 7° для предотвращения попадания френелевского отражения в сердцевину, конусного ЭВС при помощи объёмного ввода через пару линз. Это позволило усилить введённый в тонкий конец при помощи сварки сигнал до средней мощности 1,63 Вт. Импульсы длительностью 80 нс были усилены до пиковой мощности 20 кВт без наблюдения импульсной нестабильности, связанной с ВРМБ. Энергия таких импульсов составила 1,5 мДж.

В **третьей главе** описываются результаты увеличения эффективности ВУ для спектрального диапазона вблизи 1,55 мкм с применением солегирования иттербием. В **параграфе 3.1** описывается разработанный ЭИВС с накачкой по оболочке. Коллегами автора была проведена работа по оптимизации метода MVCD, которая позволила получить ВС, с сердцевиной легированной до 6,5 мол. % оксида фосфора и до 0,9 вес. % фтора.

Было произведено исследование растворимости иттербия в данной матрице. Было обнаружено, что при увеличении концентрации иттербия с 2 вес. % до 2,3 вес. % серые потери вырастают с 0,01-0,03 дБ/м до нескольких дБ/м. При этом на изображении, полученном при помощи сканирующего электронного микроскопа, видно появление обогащенных иттербием областей, выполняющих роль рассеивающих центров.

Для определения оптимальной концентрации эрбия было проведено исследование ЭПВ между ионами иттербия и эрбия аналогично [9]. Установлено, что ЭПВ возрастает с 20 % при соотношении концентрации иттербия к эрбию больше 10 до 38 % при 3. При этом ЭПВ для лучшего коммерчески доступного ЭИВС Nufern LMA-EYDF-25P/300-HE составляет 90 %.

В первую очередь ЭИВС были изучены в схеме ВУ с попутной накачкой. Несмотря на то, что эффективность ЭИВУ в данной конфигурации оказывается ниже, чем при встречной накачке, она исключает неточность, вызванную потерями на сварку в схеме со встречной накачкой или схеме ВЛ. Изготовленные ЭИВС имели одинаковую дифференциальную эффективность 19,4 % независимо от ЭПВ, в то время как Nufern имел эффективность 26,2 %. Для достижения максимальной эффективности в произведённых ЭИВС была использована схема ВЛ, где одним из зеркал резонатора служила волоконная брэгговская решётка с высоким коэффициентом отражения, а вторым – торец ЭИВС. Из рисунка 4 видно, что разработанный ЭИВУ имеет сравнимую эффективность с коммерчески доступным ЭИВУ, однако качество пучка быстро ухудшается с ростом выходной мощности и не компенсируется уменьшением радиуса изгиба. В то же время параметр качества пучка M^2 разработанного ЭИВС остаётся меньше 1,1 для всего диапазона выходных мощностей.

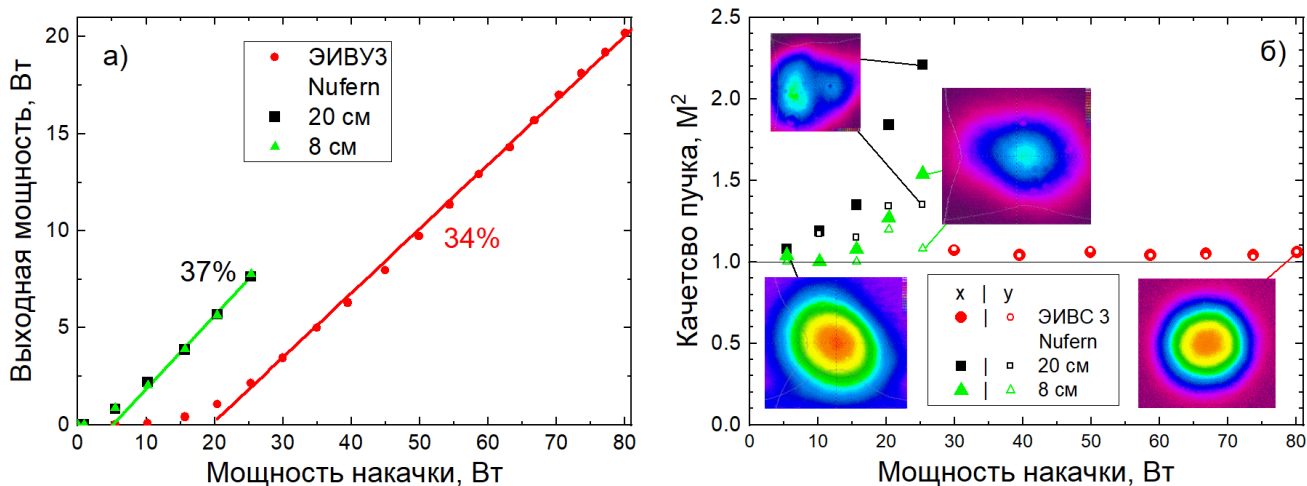


Рисунок 4. а) Зависимость выходной мощности ВЛ от мощности накачки в тестируемых ЭИВС. б) Показатель качества пучка M^2 на выходе ВЛ, измеренный Thorlabs M2MS-BP209IR, от мощности накачки. Вставки - распределения интенсивности выходного излучения ВЛ в дальнем поле, полученные камерой Spiricon SP-1550M.

В параграфе 3.2 приводится анализ недостатков ЭВУ и ЭИВУ с накачкой по оболочке. ЭВУ имеют низкую эффективность из-за кооперативной апконверсии. Это приводит к ограничению максимального поглощения накачки и, помимо уменьшения эффективности за счёт актов апконверсии, большой доле непоглощённой накачке при оптимальной длине ЭВС. Наглядно это можно увидеть на рисунке 5 а). На оптимальной длине (максимальная мощность сигнала) более 25% накачки остаётся непоглощённой. Более того, при уменьшении длины для ЭВС до 1 метра для получения пиковой мощности 4 кВт в импульсе с узкой спектральной шириной [10] 60% накачки остаётся непоглощённой, что приводит к уменьшению эффективности до 5%.

В параграфе 3.1 приводились эффективности ЭИВС в режимах ВУ и ВЛ, и было показано, что эффективность в режиме ВЛ оказывается выше. Это связано с большой мощностью входного сигнала, требуемой для насыщения ЭИВС. На рисунке 5 б) видно, что в то время, как эффективность ЭВУ насыщается при входной мощности менее 0,5 Вт, насыщения ЭИВУ не происходит даже для входной мощности 3 Вт.

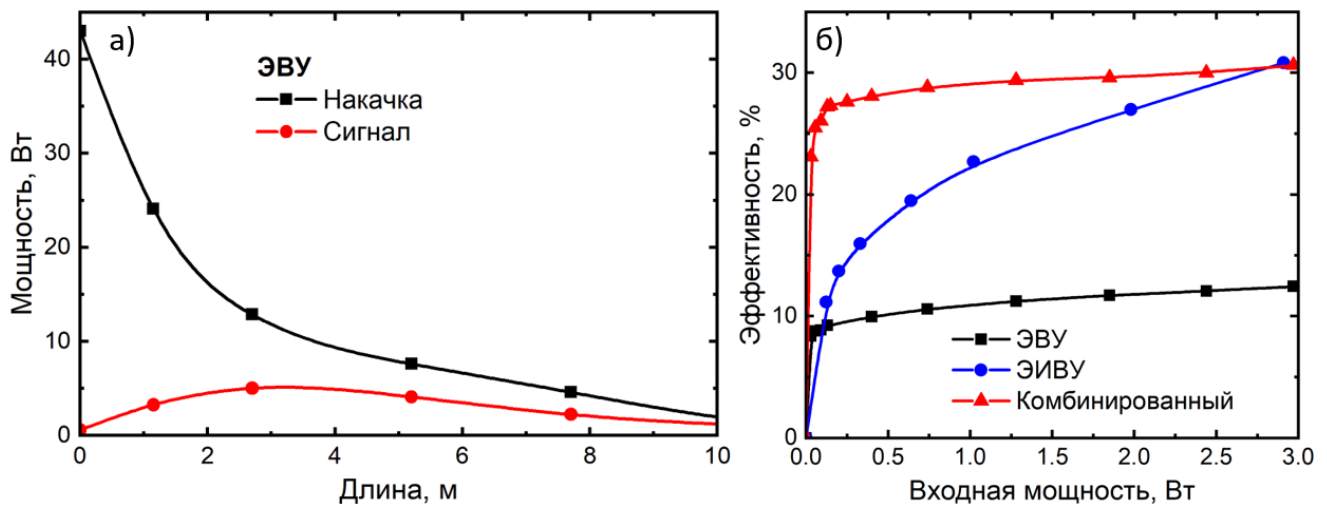


Рисунок 5. а) Измеренные распределения накачки (976 нм) и сигнала (1557 нм) по длине ЭВУ на основе АФС ЭВС; б) Эффективность от мощности входного сигнала на длине волны 1557 нм для 1,5 м ЭВУ, 0,5 м коммерчески доступного ЭИВУ Nufern LMA-EYDF-25P/300-HE и комбинированного усилителя, состоящего из 1,5 м ЭВС и 0,5 м ЭИВС.

Причина данного явления – высокая инверсная населённость ионов эрбия в таких ВУ при малом входном сигнале и высокой интенсивности накачки. При этом вероятность апконверсии при передаче возбуждения от ионов иттербия к возбуждённым ионам эрбия становится очень высокой. Это приводит к потере фотона накачки и снижению полной эффективности ЭИВУ. Выходная мощность предусилителя ограничена намного более низким порогом ВРМБ, что приводит либо к низкой эффективности [11] либо к предусилителям с характеристиками и стоимостью близкими к основному усилителю [12]. Схемы со встречной накачкой требуют меньшую входную мощность для насыщения ЭИВУ, однако дополнительная длина пассивного ВС (в объединителях сигнала и накачки) ограничивает максимальную пиковую мощность в полностью волоконном исполнении.

Компенсировать слабое поглощение накачки в ЭВУ и требование большой входной мощности в ЭИВУ позволяет комбинированный эрбиевый/эрбий-иттербиевый усилитель, получающийся путём прямой сварки ЭИВС сразу после ЭВС (красная кривая на рисунке 5 б). В такой конфигурации ЭВС выполняет роль

предусилительного каскада для ЭИВС, усиливая слабый входной сигнал (1-100 мВт) до нескольких Вт с высокой эффективностью по отношению к поглощённой мощности накачки. Непоглощённая мощность накачки после ЭВС практически полностью поглощается ЭИВС, который работает в режиме насыщения с высокой эффективностью. Таким образом, весь ВУ имеет высокую эффективность и высокое усиление. Дополнительное преимущество подхода комбинированного усилителя – возможность использования ЭВС и ЭИВС с разными составами сердцевины (аналогично параграфу 2.1) для повышения порога ВРМБ.

В параграфе 3.3 описывается реализация конструкции комбинированного усилителя на основе описанного в параграфе 3.1 АФС ЭВС и описанного в параграфе 3.1 коммерчески доступного ЭИВС Nufern LMA-EYDF-25P/300-HE для усиления спектрально ограниченных наносекундных импульсов до большой пиковой мощности с высокой эффективностью. Обосновываются факторы выбора длин ЭВС и ЭИВС. Оптимальная длина ЭИВС определялась по измерению выходной мощности сигнала при входной мощности сигнала 3 Вт и составила 0,5 метра. Для выбора оптимальной длины ЭВС была проведена серия измерений порога ВРМБ и эффективности усиления при большой частоте повторения в комбинированном усилителе при разной длине ЭВС. Измерения порога ВРМБ производились для импульсов длительностью 70 нс по наблюдению начала импульсной нестабильности, выражающейся в осцилляциях вблизи заднего фронта импульса. При длине ЭВС 0,5 и 1 метров порог ВРМБ был неизменным и равен 4 кВт, поэтому можно заключить, что пиковая мощность ограничивается порогом ВРМБ 4 кВт в 0,5 метрах ЭИВС. Оптимальной длиной ЭВС оказалась длина 1,5 метра, при которой наблюдается понижение порога ВРМБ до 3,7 кВт и рост эффективности до величины 26,3 %. Дальнейшее увеличение длины ЭВС не приводит к росту эффективности.

Для оценки максимальных характеристик оптимизированного усилителя был проведён эксперимент по усилению импульсов длительностью 160 нс. Результаты приведены на рисунке 6. Максимальная энергия в импульсе составила 460 мкДж. Пиковая мощность, рассчитанная из энергии и формы импульса, составила 3,7 кВт. Эта мощность соответствует порогу ВРМБ, установленному по наблюдению нестабильностей на заднем фронте импульса (провал на рисунке 6 а) и по превышению доли мощности, отражённой из-за ВРМБ, величины 0,1%.

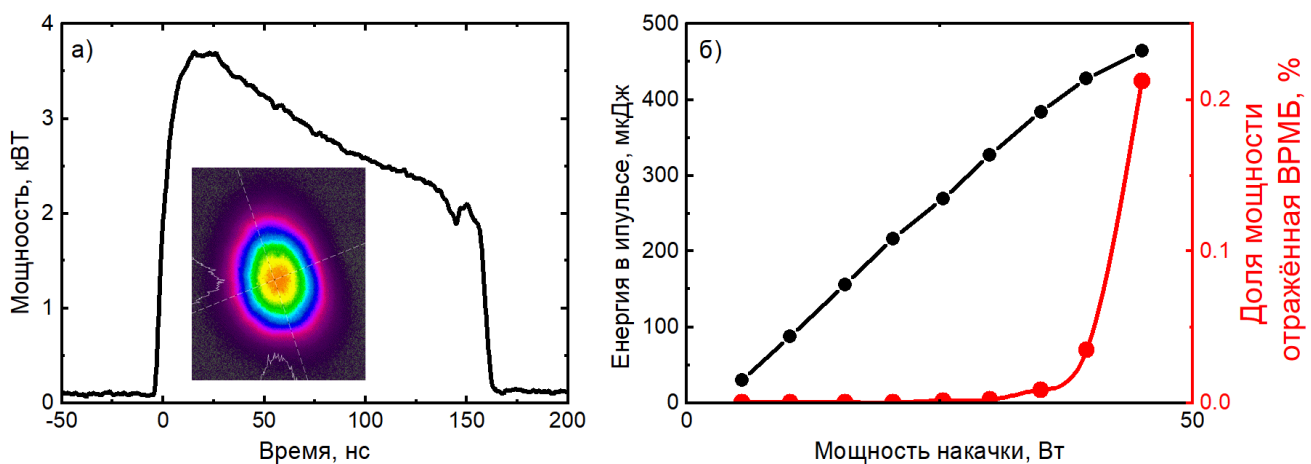


Рисунок 6. а) Форма импульса при максимальной мощности накачки в комбинированном усилителе; вставка - распределение интенсивности выходного излучения в дальнем поле, полученное камерой Spiricon SP-1550M. б) Энергия в импульсе и доля мощности, отражённой назад из-за ВРМБ.

В параграфе 3.4 представлена реализация конструкции комбинированного усилителя с сохранением поляризации и созданного на его основе усилительного модуля. Так как на основе комбинированного усилителя создавался усилительный модуль, порог ВРМБ в нём ограничивается нелинейностью не только самого усилителя, но и длиной пассивного ВС в выходных компонентах. При наличии всего двух выходных компонент, в силу ограничения на минимальную длину пассивного ВС сварочным аппаратом, порог ВРМБ понижается до 600 Вт. По этой причине длины активных ВС оптимизировались для этого уровня пиковой мощности.

В качестве ЭВС использовался изготовленный коллегами автора ЭВС с фтор-алюмосиликатной матрицей сердцевины. ЭВС имел два боросиликатных стержня для создания двулучепреломления в сердцевине. Диаметр сердцевины вытянутого ВС составил 36 мкм, оболочки – 130 мкм. Расчётный диаметр поля моды составил 24,7 мкм. Экстинкция при измерении в пассивном режиме (без присутствия излучения накачки) составила > 15 дБ. В качестве ЭИВС использовался коммерчески доступный аналог ЭИВС, использовавшегося в параграфах 3.1 и 3.3, с сохранением поляризации - PLMA-EYDF-25P/300-HE, Nufern. Была выбрана длина ЭВС равная 2,9 метра и длина ЭИВС равная 0,8 метра. В таком ВУ наблюдалось усиление спектрально ограниченных 400 нс импульсов до пиковой мощности 660 Вт, ограниченной порогом ВРМБ в ВУ. Экстинкция на выходе ВУ составила 11 дБ.

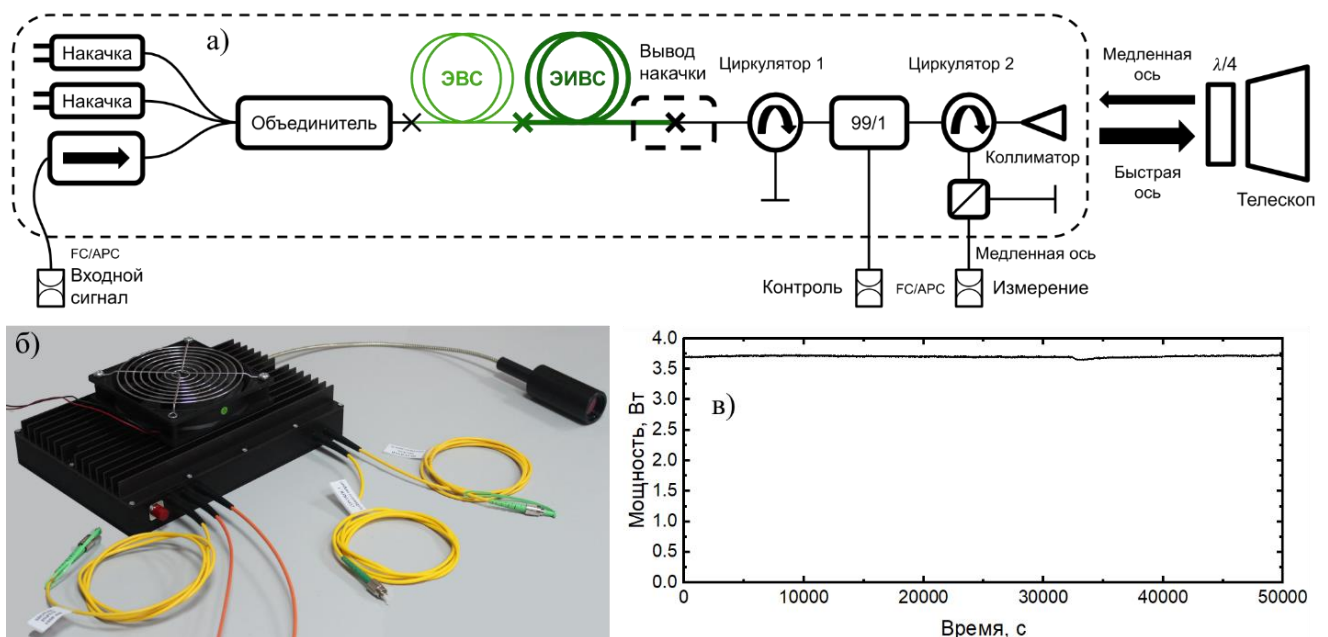


Рисунок 7. а) Схема усилительного модуля; б) Усилительный модуль, упакованный в алюминиевый корпус 25x17x4 см; в) Тест долговременной стабильности усилительного модуля.

На основе этого комбинированного ВУ был создан усилительный модуль для доплеровского LIDAR'a, схема и фотография которого представлены на рисунке 7. Из-за потерь на выходных компонентах, рассчитанных на большую

среднюю мощность, максимальная пиковая мощность была уменьшена до величины 330 Вт. Использование поляризующего циркулятора позволило повысить экстинкцию до 18 дБ. Был проведён тест долговременной стабильности на протяжении 14 ч (рисунок 7 в) при максимальной мощности накачки – 41 Вт (3,6 Вт выходной мощности). Стандартное отклонение составило 0,014 Вт – 0,4%.

В главе 4 приводятся результаты исследования способов повышения порога ВРМБ в пассивных ВС. В параграфе 4.1 проведено исследование акустической антиволноводной структуры с увеличивающимся по радиусу акустическим показателем преломления, который задаётся по следующей формуле: $n_A = \frac{V_{SiO_2}}{V}$, где V_{SiO_2} – скорость звука в кварцевой оболочке, а V – локальная скорость звука. Он создавался за счёт одновременного легирования сердцевины оксидами германия, уменьшающего скорость звука, и алюминия, увеличивающего скорость звука. Оптический профиль оставался близким к ступенчатому. Концентрации оксида германия и оксида алюминия на границе сердцевины и оболочки были подобраны таким образом, чтобы скорость звука была равна скорости звука нелегированного кварцевого стекла. В 1-й заготовке акустический профиль имеет “вогнутую” форму, в то время как во 2-й – “выгнутую”, близкую к параболической (рисунок 8 а).

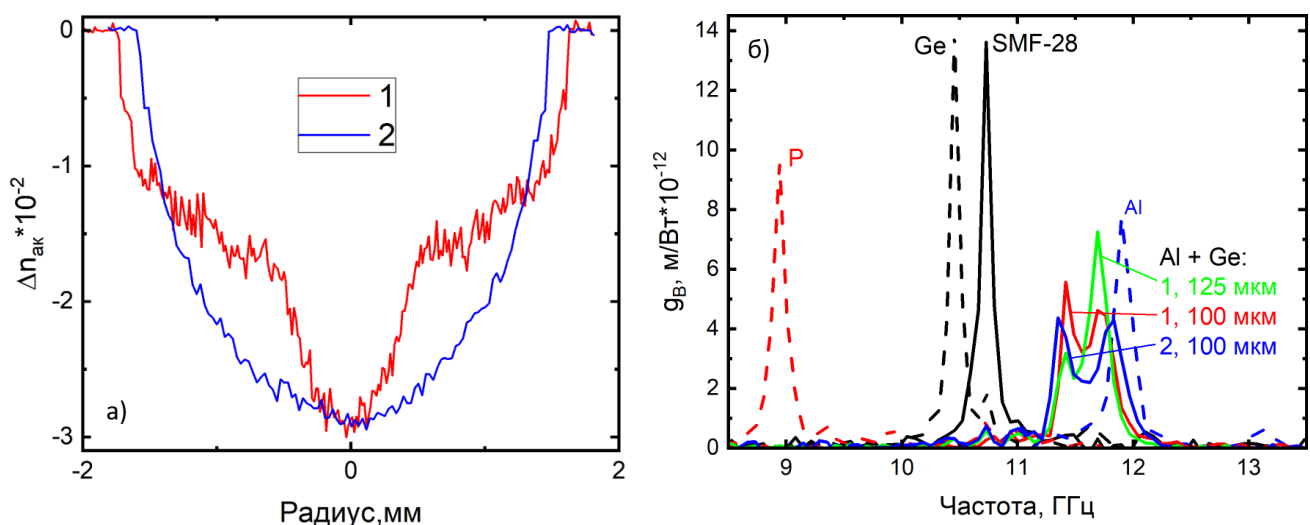


Рисунок 8. а) Акустический профиль ВС из параграфа 4.1; б) Спектры ВРМБ, измеренные в ВС из параграфа 4.1

Так как ВРМБ происходит на акустических модах сердцевины в случае акустического волноведущего профиля и на вытекающих акустических модах в случае акустического антиволноводного профиля, его спектр зависит от перекрытия акустических и оптических мод. По этой причине из заготовки 1 были вытянуты ВС с разным внешним диаметром: 125 и 100 мкм, а из заготовки 2 – 100 мкм. Так же для сравнения были взяты ВС, сердцевина которых равномерна легирована германием, алюминием и фосфором со схожими волноводными параметрами ($NA = 0.14-0.17$, диаметр поля моды ~ 8 мкм). В этих ВС были измерены спектры ВРМБ методом пробного сигнала [13]; результаты приведены на рисунке 8 б). Видно, что спектры световодов, не обладающих акустической антиволноводной структурой (P, Al, Ge, SMF-28) имеют один ярко выраженный пик, тогда как спектры исследуемых световодов (Al+ Ge, 1 и 2) имеют два соизмеримых пика, наличие которых обусловлено взаимодействием оптической моды с акустическими модами сердцевины и оболочки. Максимальное подавление ВРМБ достигнуто в ВС с параболическим акустическим антиволноводным профилем показателя преломления; величина подавления составляет 4,9 дБ по сравнению со стандартным телекоммуникационным ВС SMF-28. Измерения порога ВРМБ в данных ВС одинаковой длины показали немного меньший результат – 4,4 дБ.

В параграфе 4.2 описываются результаты исследования метода повышения порога ВРМБ путём создания акустического волноводного профиля с увеличивающимся по радиусу акустическим показателем преломления, где локализация акустических мод смещается к границе сердцевины и оболочки, что приводит к уменьшению перекрытия акустических и оптической мод. Сначала были сделаны ВС с тремя равномерно легированными слоями, толщина которых подбиралась по условию одинаковой доли мощности, распространяющейся по ним при длине волны 1550 нм: центральный слой, легированный только оксидом алюминия; средний слой, легированный оксидами алюминия и германия, и

крайний слой, легированный только оксидом германия. Было создано две вариации: с большой числовой апертурой – 0,24 и маленькой сердцевиной диаметром 3,5 мкм и с малой числовой апертурой – 0,075 и большой сердцевиной диаметром 20 мкм. Спектр ВРМБ для ВС с большой числовой апертурой имел 3 пика, частоты и относительные амплитуды которых изменялись в зависимости от внешнего диаметра ВС. Максимальное подавление на 6,4 дБ по сравнению с SMF-28 было достигнуто в ВС с внешним диаметром 135 мкм. Спектр ВРМБ ВС с малой числовой апертурой имел два пика, частоты которых не зависели от внешнего диаметра ВС. Диаметр ВС оказывал влияние только на относительные амплитуды этих пиков. Максимальное подавление на 3,3 дБ по сравнению с германосиликатным ВС с равномерным профилем легирования и такими же диаметром сердцевины и числовой апертурой было достигнуто для ВС с внешним диаметром 150 мкм.

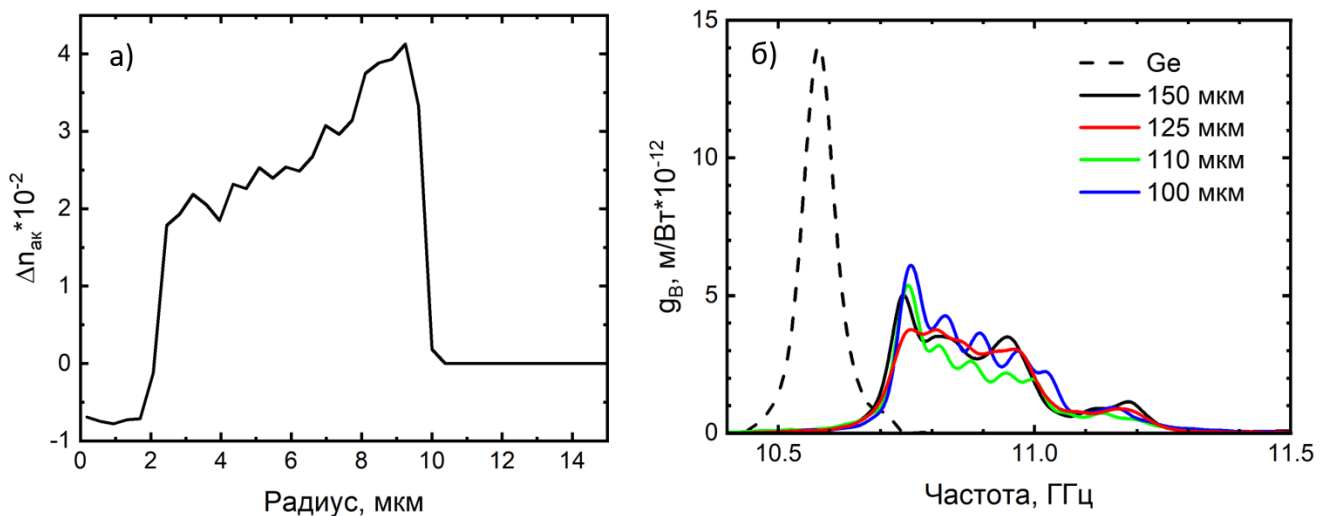


Рисунок 9. а) Акустический профиль многослойного ВС из параграфа 4.2; б) Спектры ВРМБ, измеренные в многослойном ВС из параграфа 4.2

Далее описывается развитие этого метода путём увеличения количества слоёв и акустического показателя преломления на краю сердцевины путём внесения в крайние слои сердцевины фтора, который компенсировал увеличение показателя преломления, вызванное увеличенной концентрацией германия. На рисунке 9 а) представлен полученный профиль акустического показателя

преломления. Диаметр сердцевины этого равнялся 10 мкм при внешнем диаметре 125 мкм, а числовая апертура – 0,075. Из рисунка 9 б) видно, что увеличение количества слоёв привело к росту количества пиков в спектре ВРМБ. Их амплитуды сравниваются для ВС с внешним диаметром 125 мкм. По результатам измерения порога подавление ВРМБ составило 4,8 дБ.

В параграфе 4.3 описывается новый метод подавления ВРМБ в ВС путём смещения его сердцевины к краю оболочки с последующим наматывание его на катушку маленького диаметра. Это позволяет создать периодический градиент деформации в сердцевине ВС без сложных систем, описанных в работах [14,15,16] (см. рисунок 10 а). Сердцевина была легирована 24 мол.% GeO_2 , что соответствует числовой апертуре 0,32. Заготовка была нахлопнута, затем сполирована для получения сердцевины, существенно смещенной от оси световода. После вытяжки ВС диаметром 125 мкм сердцевина имела диаметр 8 мкм, при этом ее ось находилась на расстоянии 13 мкм относительно края оболочки. Из рисунка 10 б) видно, что ширина спектра на полувысоте увеличивается с 78 МГц до 272 МГц, что говорит о подавлении ВРМБ на 4,1 дБ.

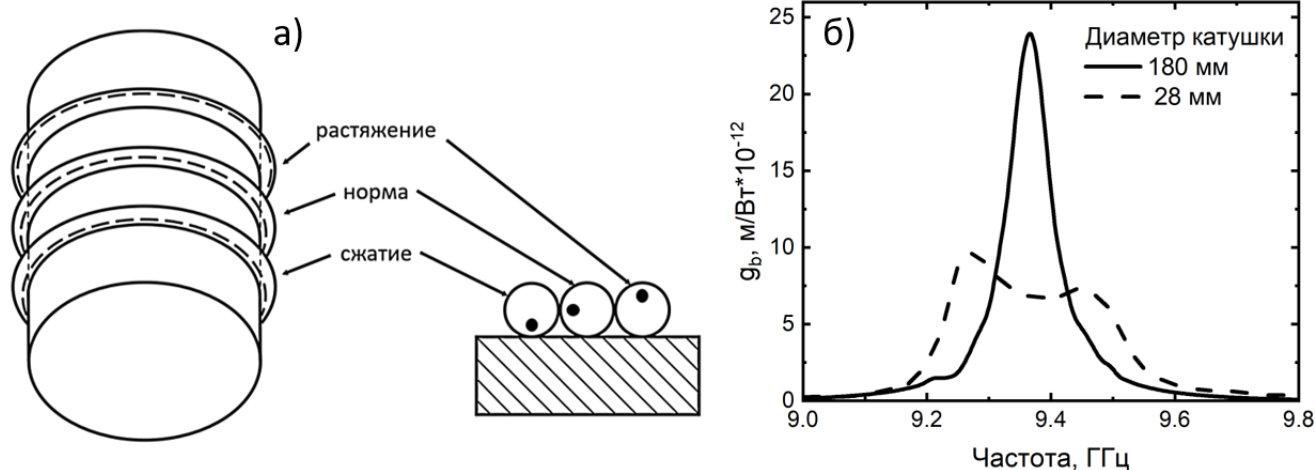


Рисунок 10. а) Схема намотки ВС со смещённой сердцевиной. б) Измеренный спектр ВРМБ в 50 м ВС со смещённой сердцевиной.

В заключении сформулированы следующие основные результаты диссертации:

1. Проведено исследование влияния длины волны накачки (976 нм и 981 нм) на эффективность ЭВС с накачкой по оболочке для АФС матрицы стекла сердцевины. Показано, что оптимальным является использование накачки с центральной длиной волны 981 нм. Такая накачка позволяет достичь максимально возможную эффективность и/или пиковую мощность при усилении импульсного излучения в коротковолновой области (С-диапазон). В частности, продемонстрирована рекордно высокая пиковая мощность для полностью волоконных усилителей наносекундной импульсов.
2. Изучена новая ФГАС матрицы стекла сердцевины ВС с большой концентрацией алюминия и фтора. Показано, что использование этой матрицы позволяет обеспечить максимальную эффективность работы ЭВС при накачке в оболочку на длине волны 976 нм, а также при работе в длинноволновой области (L-диапазон). Показано, что одновременное использование двух разработанных типов ЭВС (АФС и ФГАС) в одном усилителе позволяет повысить порог ВРМБ при неизменной эффективности по сравнению с ВУ, состоящим только из одного типа ЭВС.
3. Экспериментально продемонстрирована возможность повышения эффективности ЭВС до 48,7 % для излучения на длине волны 1565 нм при повышении соотношения диаметра многомодовой сердцевины к диаметру оболочки до 0,76. Полученная эффективность является максимальной на сегодняшний день для эрбиевых (без иттербия) ВУ с накачкой по оболочке на 976 нм.
4. Продемонстрировано увеличение поля моды излучения в ВС с увеличивающимся по длине диаметром до 53,4 мкм с качеством пучка близким к дифракционно ограниченному (параметр $M^2 = 1,26$). Такой диаметр поля моды более чем в пять раз превышает диаметр поля моды в

стандартных телекоммуникационных ВС и является рекордно большим среди эрбиевых ВС с большой площадью моды и работающих в одномодовом режиме. Впервые было продемонстрировано достижение пиковой мощности в одномодовых спектрально ограниченных наносекундных импульсах в спектральной области около 1,55 мкм – 20 кВт.

5. Был разработан одномодовый для спектральной области вблизи 1,55 мкм ЭИВС с увеличенной до 18 мкм площадью моды. Излучение такого ЭИВС остаётся дифракционно ограниченным ($M^2 < 1,1$) независимо от выходной мощности, в то время как качество пучка выходного излучения предложенных ранее конструкций ЭИВС с увеличенным полем с моды, падает с ростом выходной мощности в схеме лазера.
6. Впервые реализована конструкция полностью волоконного комбинированного эрбиего/эрбий-иттербиего ВУ, позволяющего объединить достоинства каждого из использованных типов ВС – высокий коэффициент усиления в ЭВС и высокая эффективность преобразования в ЭИВС. Продемонстрирована рекордно высокая эффективность преобразования накачки в сигнал 23,6% для усиления спектрально ограниченных наносекундных импульсов до пиковой мощности 3,7 кВт.
7. Проведено исследование спектров ВРМБ в ВС, обладающих неоднородной по радиусу акустической структурой (как волноводной, так и антиволноводной). Показано, что для оптически одномодовых ВС наибольшей степени подавления ВРМБ можно достичь, сформировав многомодовый акустический профиль, полученный совместным легированием оксидами алюминия и германия. При этом различная комбинация концентраций оксидов германия и алюминия позволяет менять акустический ППП и оставлять неизменным оптический ППП. Такой подход позволил создать ВС с заданными оптическими характеристиками и порогом ВРМБ, увеличенным относительно случая равномерного легирования по радиусу: на 6,4 дБ для ВС с увеличенной апертурой

сердцевины ($NA=0,24$) и на 4,8 дБ для ВС с уменьшенной апертурой сердцевины ($NA=0,075$) и большим диаметром поля моды.

8. Впервые исследован метод повышения порога ВРМБ созданием периодического градиента напряжения в смещённой сердцевине пассивного ВС при помощи его намотки на катушку малого диаметра. По результатам измерений спектра ВРМБ ВС, намотанного на катушки с диаметрами 180 и 28 мм, получено подавление ВРМБ на 4,1 дБ.

Публикации автора по теме диссертации

1. Худяков М. М., Лихачёв М. Е., Бубнов М. М., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Темялко В., Нагел Д., Пейгамбарян Н. Измерение порога ВРМБ в световодах с акустической антиволноводной структурой // Всероссийская конференция по волоконной оптике (Фотон-экспресс). г. Пермь: , 2015. С. 258–259.
2. Худяков М. М., Лихачёв М. Е., Бубнов М. М., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Темялко В., Нагел Д., Пейгамбарян Н. Оптимизация акустической антиволноводной структуры для повышения порога ВРМБ в волоконных световодах // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 5. С. 468–472.
3. Худяков М. М., Лихачёв М. Е., Бубнов М. М., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н. Световод с трёхслойной сердцевинной для повышения порога вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна // Российский семинар по волоконным лазерам. г. Новосибирск: , 2016. С. 113–115.
4. Khudyakov M. M., Likhachev M. E., Bubnov M. M., Lipatov D. S., Lobanov A. S., Gur'yanov A. N. Three layer fiber with high stimulated Brillouin scattering threshold // Proc.SPIE, 2017. P. 1008313.
5. Khudyakov M. M., Bubnov M. M., Lipatov D. S., Lobanov A. S., Gur'yanov A. N., Likhachev M. E. Suppression of Brillouin scattering in large mode area passive fibers // CLEO/Europe. Munich, Germany, 2017. paper CJ_4_2.
6. Kotov L. V, Aleshkina S. S., Khudyakov M. M., Bubnov M. M., Medvedkov O. I., Lipatov D. S., Gur'yanov A. N., Likhachev M. M. High-Brightness Multimode Fiber Lasers for Resonant Pumping // J. Light. Technol. 2017. Vol. 35. № 20. P. 4540–4546.
7. Худяков М. М., Бубнов М. М., Сенаторов А. К., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Рыбалтовский А. А., Бутов О. В., Лихачёв М. Е. Полностью волоконный импульсный наносекундный эрбиевый лазер с рекордной пиковой мощностью 70 киловатт // Всероссийская конференция по волоконной оптике (Фотон-экспресс). , 2017. С. 55–56.

8. Худяков М. М., Бубнов М. М., Липатов Д. С., Лобанов А. С., Гурьянов А. Н., Лихачёв М. Е. Подавление вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в пассивных волоконных световодах с большим полем моды // Всероссийская конференция по волоконной оптике (Фотон-экспресс) . , 2017. С. 151–152.
9. Khudyakov M. M., Levchenko A. E., Velmiskin V. V, Bobkov K. K., Lipatov D. S. High Peak Power Er-doped Tapered Fiber Amplifier // *Photoptics* . , 2018. P. 105–109.
10. Khudyakov M. M., Bubnov M. M., Senatorov A. K., Lipatov D. S., Likhachev M. E., Rybaltovsky A. A., Butov O. V., Gur'yanov A. N., Kotov L. V. Cladding-pumped 70-kW-peak-power 2-ns-pulse Er-doped fiber amplifier // *Proc. SPIE*, 2018. P. 1051216.
11. Khudyakov M. M., Levchenko A. E., Velmiskin V. V., Bobkov K. K., Lipatov D. S., Guryanov A. N., Bubnov M. M., Likhachev M. E. 107-kW-Peak-Power 2-ns Pulse Tapered Er-doped Fiber Amplifier // *ICLO*, 2018. P. 13–13.
12. Khudyakov M. M., Lobanov A. S., Lipatov D. S., Vechkanov N. N., Gur'yanov A. N., Bubnov M. M., Likhachev M. E. All Fiber Combined Er/Er-Yb Fiber Amplifier // *Нелинейная фотоника. Материалы Международной школы для молодых ученых*. 2018. , 2018. С. 10–11.
13. Худяков М. М., Алёшкина С. С., Кочергина Т. А., Бобков К. К., Лобанов А. С., Липатов Д. С., Абрамов А. Н., Гурьянов А. Н., Бубнов М. М., Лихачёв М. Е. Одномодовый Er-Yb волоконный усилитель с большим диаметром поля моды // *Российский семинар по волоконным лазерам.*, 2018. С. 65–66.
14. Khudyakov M. M., Lipatov D. S., Gur'yanov A. N., Bubnov M. M., Likhachev M. E. High-peak-power highly-efficient combined Er/Er-Yb fiber amplifier // *Proc. SPIE*, 2019. P. 108971X.
15. Khudyakov M. M., Lobanov A. S., Lipatov D. S., Bobkov K. K., Aleshkina S. S., Kochergina T. A., Bubnov M. M., Abramov A. N., Vechkanov N. N., Guryanov A. N., Likhachev M. E. Single-mode large-mode-area Er-Yb fiber // *Proc. SPIE*, 2019. P. 109141R.
16. Khudyakov M. M., Lobanov A. S., Lipatov D. S., Abramov A. N., Vechkanov N. N., Gur'yanov A. N., Melkumov M. A. A., Bobkov K. K., Aleshkina S. S., Kochergina T. A., Iskhakova L. D., Milovich F. O., Bubnov M. M., Likhachev M. E. Single-mode large-mode-area Er-Yb fibers with core based on phosphorosilicate glass highly doped with fluorine // *Laser Phys. Lett.* 2019. Vol. 16. № 2. P. 025105.
17. Khudyakov M. M., Lipatov D. S., Gur'yanov A. N., Bubnov M. M., Likhachev M. E. Single-Frequency Sub-kW-Peak-Power Combined Er/Er-Yb-Fibers Amplifier with a High Pump-to-Signal Conversion Efficiency // *CLEO Europe*. P. 1–1.
18. Khudyakov M. M., Yashkov M. V., Lipatov D. S., Vechkanov N. N., Abramov A. N., Gur'yanov A. N., Likhachev M. E. L-band Amplifiers Based on Cladding-Pumped Er-Doped (Yb-Free) Fibers with Al₂O₃-SiO₂ Core Highly Doped by Fluorine // *CLEO Europe* . , 2019. paper cj_p_14.

19. Lipatov D., Likhachev M., Lobanov A., Abramov A., Guryanov A., Khudyakov M., Aleshkina S., Bobkov K., Bubnov M., Kochergina T. Single-Mode Er-Yb Fiber with 20 μm F-P2O5-SiO2 Core // CLEO Europe, 2019. P. 1–1.
20. Khudyakov M. M., Lipatov D. S., Guryanov A. N., Bubnov M. M., Likhachev M. E. All fiber combined Er/Er-Yb amplifier for efficient amplification of high peak power single frequency pulses // ASSL., 2019. paper JM5A.28.
21. Khudyakov M. M., Yashkov M. V, Lipatov D. S., Guryanov A. N., Bubnov M. M., Likhachev M. E. SBS threshold suppression in Er-doped fiber amplifier by using fibers with different core composition // ASSL. ,2019. paper JTu3A.13.
22. Kotov L., Temyanko V., Peyghambarian N., Bubnov M., Khudyakov M., Likhachev M. Quasi-cw Er-doped fiber laser near 1535 nm for Er:YAG pumping. // ASSL. , 2019. paper JTh3A.6.
23. Худяков М. М., Бубнов М. М., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Лихачёв М. Е. Полностью волоконный комбинированный Er/Er-Yb усилитель одночастотных импульсов с пиковой мощностью 2 кВт и высокой эффективностью // Всероссийская конференция по волоконной оптике (Фотон-экспресс). , 2019. С. 254–255.
24. Khudyakov M. M. Progress in monolithic high peak power Er-doped fiber amplifiers // AFL. , 2019. Invited.
25. Khudyakov M. M., Lobanov A. S., Lipatov D. S., Abramov A. N., Vechkanov N. N., Gur'yanov A. N., Melkumov M. A. A., Bobkov K. K., Aleshkina S. S., Kochergina T. A., Iskhakova L. D., Milovich F. O., Bubnov M. M., Likhachev M. E. Single-mode large-mode-area Er-Yb fibers with core based on phosphorosilicate glass highly doped with fluorine // Laser Phys. Lett. 2019. vol. 16. № 2. P. 025105.
26. Khudyakov M. M., Lipatov D. S., Gur'yanov A. N., Bubnov M. M., Likhachev M. E. Highly efficient 3.7 kW peak-power single-frequency combined Er/Er-Yb fiber amplifier // Opt. Lett. 2020. Vol. 45. № 7. P. 1782.
27. Khudyakov M., Alekseev V., Lipatov D. S., Gur'yanov A. N., Temyanko V., Bubnov M. M., Likhachev M. E. Fiber with off-center core for SBS suppression // SOF., 2020. paper SoTu2H.5.
28. Худяков М. М., Алексеев В. В., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Темялко В., Бубнов М. М., Лихачёв М. Е. Волоконный световод со смещённой сердцевиной для подавления ВРМБ // Российский семинар по волоконным лазерам. С. 160–161.
29. Худяков М. М., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Бубнов М. М., Лихачев М. Е. Высокоэффективный комбинированный Er/Er-Yb усилитель с высокой пиковой мощностью и сохранением поляризации. // Прикладная фотоника. 2020. Т. 7. № 4. С. 5–18. **НЕ ВАК !!ХЗ!!**

30. Худяков М. М., Алексеев В. В., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Темялко В., Бубнов М. М., Лихачёв М. Е. Волоконный световод со смещённой сердцевиной для подавления ВРМБ // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. № 3. С. 228–231.

Список цитируемых работ

- 1 Jelínková H. et al. Anterior eye tissue transmission for the radiation with the wavelength from eye safe region // *Laser Phys. Lett.* 2005a. Vol. 2. № 12. P. 603–607.
- 2 Gladyshev A. V. et al. 2.9, 3.3, and 3.5 μm Raman Lasers Based on Revolver Hollow-Core Silica Fiber Filled by $1\text{H}_2/\text{D}_2$ Gas Mixture // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2018b. Vol. 24. № 3. P. 1–8.
- 3 Yashkov M. V et al. Optical properties of heavily ytterbium- and fluorine-doped aluminosilicate core fibres // *Quantum Electron.* 2017c. Vol. 47. № 12. P. 1099–1104.
- 4 Kotov L. V. et al. 75 W 40% efficiency single-mode all-fiber erbium-doped laser cladding pumped at 976 nm // *Opt. Lett.* 2013d. Vol. 38. № 13. P. 2230.
- 5 Kotov L. et al. Millijoule pulse energy 100-nanosecond Er-doped fiber laser // *Opt. Lett.* 2015e. Vol. 40. № 7. P. 1189.
- 6 Jebali M. A., Maran J.-N., LaRochelle S. 264 W output power at 1585 nm in Er–Yb codoped fiber laser using in-band pumping // *Opt. Lett.* 2014f. Vol. 39. № 13. P. 3974.
- 7 Shen D. Y., Sahu J. K., Clarkson W. A. High-power widely tunable Tm: fibre lasers pumped by an Er, Yb co-doped fibre laser at 1.6 μm // *Opt. Express.* 2006g. Vol. 14. № 13. P. 6084.
- 8 Jung Y. et al. Selective excitation of the fundamental mode in a multimode fiber using an adiabatically tapered splice // 2009 14th OptoElectronics and Communications Conference. : IEEE, 2009h. P. 1–2.
- 9 Melkumov M. A. et al. Effects of Yb³⁺ and Er³⁺ concentrations and doping procedure on excitation transfer efficiency in Er-Yb doped phosphosilicate fibers // *Inorg. Mater.* 2010i. Vol. 46. № 3. P. 299–303.
- 10 Kotov L. V et al. Record-peak-power all-fiber single-frequency 1550 nm laser // *Laser Phys. Lett.* 2014j. Vol. 11. № 9. P. 095102.
- 11 Shi W. et al. Kilowatt-level stimulated-Brillouin-scattering-threshold monolithic transform-limited 100 ns pulsed fiber laser at 1530 nm // *Opt. Lett.* 2010k. Vol. 35. № 14. P. 2418.
- 12 Lee W. et al. 1.8 mJ, 3.5 kW single-frequency optical pulses at 1572 nm generated from an all-fiber MOPA system // *Opt. Lett.* 2018l. Vol. 43. № 10. P. 2264.
- 13 Koyamada Y. et al. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers // *J. Light. Technol.* 2004m. Vol. 22. № 2. P. 631–639.
- 14 Boggio J. M. C., Marconi J. D., Fragnito H. L. Experimental and numerical investigation of the SBS-threshold increase in an optical fiber by applying strain

distributions // J. Light. Technol. 2005n. Vol. 23. № 11. P. 3808–3814.

15 Rothenberg J. E. et al. Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency multi-kilowatt fiber amplifiers // Proc. SPIE / под ред. J. Broeng, C. Headley III. , 2008o. P. 68730O.

16 Engelbrecht R. Analysis of SBS gain shaping and threshold increase by arbitrary strain distributions // J. Light. Technol. 2014p. Vol. 32. № 9. P. 1689–1700.