

На правах рукописи



Худяков Максим Маратович

**ЭРБИЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ
С ПОВЫШЕННЫМ ПОРОГОМ ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ
МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА**

1.3.19 Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Научном центре волоконной оптики им. Е.М. Дианова (обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН»)

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 (обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН»)

Официальные оппоненты:

Дворецкий Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры РЛ-2 лазерные и оптико-электронные системы, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Наний Олег Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики и спектроскопии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

Ведущая организация:

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится 14 февраля 2022 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.223.02 при ИОФ РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. №3, 3 этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН <https://www.gpi.ru/news/dissertation-defences/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.223.02,
к.ф.-м.н.
тел. +7(499)503-8777 доб.1-47



Воляк Т.Б.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Эрбиевые волоконные усилители (ВУ) обладают достаточно широким диапазоном усиления (1530–1600 нм), попадающим в область минимума оптических потерь телекоммуникационных волоконных световодов (1550 нм), что обеспечило их широчайшее распространение в волоконно-оптических линиях связи. Именно использование эрбиевых ВУ (ЭВУ) обеспечило передачу оптического сигнала на дальние дистанции (тысяча километров и более) без использования регенераторов (устройств, где оптический сигнал преобразуется в электрический, распознается и снова преобразуется в оптический сигнал для дальнейшей передачи по оптическому волокну), тем самым кардинально снизив издержки на прокладку волоконно-оптических линий связи. Как следствие, за прошедшие более чем 30 лет с момента открытия ЭВУ была развита надежная и дешевая компонентная база для таких устройств. В ЭВУ была достигнута высокая эффективность преобразования излучения накачки в сигнальное излучение, близкая к квантовому пределу, а также продемонстрирована высокая выходная мощность, гарантировано перекрывающая потребности оптических линий связи. Данные факторы привели к активному развитию альтернативных применений ЭВУ.

Одной из особенностей излучения с длиной волны больше 1,4 мкм является то, что оно безопасно для глаз (излучение поглощается роговицей глаза и не достигает чувствительной сетчатки), и поэтому оно подходит для атмосферных применений. К таким задачам относятся, например, дистанционное измерение скорости ветра при помощи доплеровского лидара (LIDAR — LIght Detection And Ranging) и измерение концентрации CO₂ в газовом столбе. Кроме высокого качества пучка и безопасности для глаз здесь требуется малая спектральная ширина линии излучения (<10 МГц) и большая

энергия импульса (>100 мкДж). 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 волоконных лазерах (ВЛ). Нелинейным эффектом с наименьшим порогом в таких условиях является вынужденное рассеяние Манделъштама–Бриллюэна (ВРМБ).

Достижение высокой пиковой мощности и эффективности в ЭВУ и эрбиевых ВЛ 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 волоконного световода (ВС), необходимым для полного поглощения накачки. Таким образом, увеличение пиковой мощности в ЭВУ, достигаемое уменьшением длины эрбиевого волоконного световода (ЭВС), невозможно скомпенсировать повышением концентрации ионов эрбия (после определённой величины), и оно происходит за счёт уменьшения эффективности.

Для борьбы с малым сечением поглощения накачки в сердцевину ЭВС добавляют оксид иттербия. Ионы иттербия имеют на порядок большее сечение поглощения накачки и не подвержены эффекту кооперативной апконверсии (если не считать фотопотемнения). Также лазерный уровень иттербия ${}^2F_{5/2}$ обладает близкой энергией с уровнем ${}^4I_{11/2}$ эрбия, что позволяет передавать возбуждение от ионов иттербия к близлежащим ионам эрбия. Однако, для уменьшения вероятности обратного процесса, уровень ${}^4I_{11/2}$ должен иметь малое время жизни. Это достигается введением в сердцевину больших концентраций оксида фосфора, что приводит к существенному росту разности показателей преломления сердцевины и оболочки, уменьшению площади моды в одномодовом режиме и низкому порогу нелинейных

эффектов. Для решения данной проблемы был предложен ряд специальных конструкций эрбий-иттербиевых ВУ (ЭИВУ), которые позволили существенно увеличить площадь моды и сократить оптимальную длину активного ВС в усилителе. Однако ни в одном из случаев не удалось получить высокую эффективность при достижении высокой пиковой мощности на выходе усилителя. В связи с этим проблема создания ВУ с большой пиковой мощностью и одновременно большой эффективностью остаётся нерешённой.

Важно отметить, что в полностью волоконных приборах используются пассивные ВС и компоненты на их основе для доставки мощного 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 ВРМБ является актуальной задачей для увеличения пиковой мощности ВУ, используемых в лидарах.

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, используемых для атмосферного зондирования. В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследование влияния стеклянной матрицы сердцевин эрбиевого волоконного световода, длины волны накачки и его геометрии на эффективность усиления и максимально достижимый порог вынужденного рассеяния Манделъштама–Бриллюэна.
2. Разработка и исследование одномодового эрбий-иттербиевого волоконного световода с увеличенной площадью поля моды, накачкой по оболочке и большой эффективностью усиления.

3. Поиск новых подходов к созданию высокоэффективных волоконных усилителей с высокой пиковой мощностью в спектральной области вблизи 1,55 мкм.
4. Исследование методов повышения порога вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна в пассивных волоконных световодах.

Научная новизна работы

1. Проведено исследование свойств новой фтор-германий-алюмосиликатной (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 ± 1 нм (в пик поглощения ФГАС ЭВС), а также при работе в длинноволновой области (L-диапазон).
2. Впервые показано, что использование ЭВС и эрбий-иттербиевого 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, концентрация которых изменяется по радиусу световода.

Практическая значимость работы

1. Предложено одновременное использование двух типов ЭВС на основе алюмо-фосфоро-силикатной (АФС) и ФГАС стеклянных матриц в одном ВУ. Это позволяет повысить порог ВРМБ при неизменной эффективности по сравнению с ВУ, состоящим только из одного из указанных типов ЭВС.

2. Экспериментально продемонстрирована возможность повышения дифференциальной эффективности ЭВС до 48 % для излучения на длине волны 1565 нм (41 % 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 ± 1 нм. Такой ЭВУ обладает большей яркостью и лучшей масштабируемостью средней мощности по сравнению с диодными накачками в этом спектральном диапазоне.
3. Продemonстрирована рекордно высокая пиковая мощность для спектрально-ограниченных наносекундных (> 50 нс) импульсов 20 кВт с использованием конического ЭВС с увеличивающимся по его длине диаметром поля моды до 53 мкм.
4. Разработана конструкция комбинированного эрбиевого/эрбий-иттербиевого ВУ, позволившая получить рекордную дифференциальную эффективность 23 % для полностью волоконных усилителей спектрально-ограниченных наносекундных импульсов с пиковой мощностью более 3,7 кВт.

Положения, выносимые на защиту

1. Одновременное использование двух типов ЭВС с разными матрицами стекла сердцевины (АФС и ФГАС) в одном ВУ позволяет повысить порог ВРМБ при неизменной эффективности по сравнению с ВУ, состоящим только из одного типа ЭВС.
2. Увеличение соотношения диаметра многомодовой сердцевины к диаметру оболочки до 0,76 в ЭВС позволяет получить максимальную на сегодняшний день дифференциальную эффективность 48% для эрбиевых (без иттербия) ВУ с накачкой по оболочке на длине волны вблизи 976 ± 1 нм.
3. Использование конической геометрии ЭВС с увеличивающимся по длине диаметром позволяет увеличить порог ВРМБ до величины, превышающей

20 кВт при сохранении дифракционно-ограниченного качества выходного излучения (параметр качества пучка $M^2 < 1,3$).

4. Полностью волоконный комбинированный эрбиевый/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 дифференциальную эффективность преобразования накачки в сигнал 23,6% для усилителя спектрально-ограниченных наносекундных импульсов до пиковой мощности более 3,7 кВт в полностью волоконных ВУ.
5. 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 ($NA = 0,24$, $d_c = 3,2$ мкм) и на 4,8 дБ для ВС с уменьшенной апертурой сердцевины ($NA = 0,075$, $d_c = 20$ мкм) по сравнению с ВС с равномерным по радиусу легированием.
6. Комбинация локального (за счёт многомодового акустического профиля) и дополнительного распределённого по длине (за счёт вариации деформации сердцевины) уширения спектра ВРМБ позволяет повысить его порог более чем в 10 раз для ВС с увеличенной апертурой сердцевины ($NA = 0,17$, $d_c = 7,5$ мкм)

Личный вклад диссертанта

Диссертационная работа является результатом семилетней работы автора в Научном центре волоконной оптики им. Е.М. Дианова (НЦВО) и представляет собой обобщение работ автора, выполненных совместно с сотрудниками НЦВО РАН (Москва, Россия) и ИХВВ РАН (Нижний Новгород, Россия), ИРЭ РАН (Москва, Россия) и The University of Arizona

(Тусон, США). Коллективный характер экспериментальных результатов обусловил публикацию полученных результатов в соавторстве с коллегами. Все основные экспериментальные результаты работы были получены автором лично или при его определяющем участии.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлена использованием актуальных методов исследования и современного научного оборудования, анализом литературных данных, а также публикациями работ в ведущих физических научных журналах и докладами на международных конференциях.

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 8 докладах на всероссийских конференциях: Всероссийская конференция по волоконной оптике 2015, 2017, 2019, Российский семинар по волоконным лазерам 2016, 2018, 2020, а также на семинарах НЦВО РАН. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 10 статьях в изданиях, входящих в Перечень ВАК.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 106 наименований.

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** приведён обзор литературных данных по теме диссертации. Показано, что на момент начала работы над диссертацией

достижение высокой пиковой мощности для спектрально-ограниченных наносекундных импульсов в спектральной области вблизи 1,55 мкм в ВУ было возможно лишь за счёт уменьшения эффективности преобразования накачки в сигнал. Также рассмотрены существующие методы увеличения порога ВРМБ при фиксированной площади фундаментальной моды. Показано, что, несмотря на существование конструкции активного ВС с повышением порога ВРМБ на более чем 10 дБ, задача повышения порога ВРМБ в пассивных ВС с большим полем моды оказалась нерешённой.

Во **второй главе** исследованы способы повышения эффективности и пиковой мощности в ЭВС с накачкой по оболочке.

В частности, приведены результаты исследования зависимости эффективности ЭВУ от длины волны накачки и состава матрицы стекла сердцевинны (детально изучена новая фтор-германо-алюмо-силикатная (ФГАС) матрица стекла, содержащая 3 мол.% Al_2O_3 , 1,5 вес.% F и ~0,5 мол.% GeO_2). Интерес к ФГАС матрице связан с тем, что при фиксированной концентрации ионов эрбия поглощение в области 980 нм в этой матрице выше в 1,3 раза, чем в АФС (рис. 1а), и его пик смещен в область 976 нм (длина волны стандартных диодов накачки со стабилизацией длины волны). Детальные исследования показали, что ЭВУ с ФГАС и АФС стеклянной матрицей обладают сопоставимыми эффективностями, которые варьируются в 1,2–1,5 раза друг относительно друга в зависимости от комбинации длины волны накачки (976 нм предпочтительно для ФГАС и 981 нм для АФС) и спектрального диапазона, где работает усилитель (С-полоса – АФС, L-полоса – ФГАС).

В то же время взаимозаменяемость ЭВС на основе разных матриц позволяет создать составной ВУ с использованием ЭВС с разными матрицами без значительного падения эффективности. Установлено, что разные матрицы сердцевинны обладают разной резонансной частотой ВРМБ, что в теории позволяет сократить эффективную нелинейную длину ВУ в 2 раза. Сравнение

порога ВРМБ в трёх ЭВУ с одинаковой суммарной длиной на различных ЭВС (2,6 м АФС ЭВС, 2,6 м ФГАС ЭВС и составной ВУ состоящий из 1,5 м АФС и 1,1 м ФГАС ЭВС) показало, что эффективность всех ЭВУ практически одинакова, в то время как порог ВРМБ оказался равным 1 и 1,2 кВт для ФГАС и АФС соответственно и 1,8 кВт для составного ЭВУ. Таким образом, использование составного ЭВУ позволило повысить порог ВРМБ в 1,5 раза без потери эффективности относительно ЭВУ, содержащего только один тип ВС (рис. 1б).

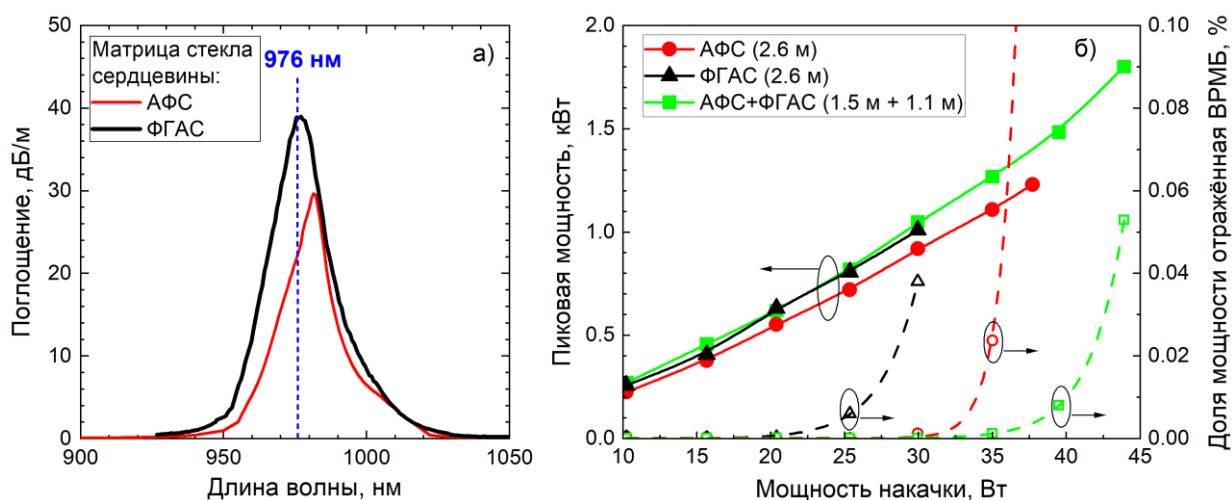


Рис. 1. а) Поглощение слабого сигнала сердцевинной в исследуемых ЭВС в области 0,98 мкм (спектры нормированы по пику 1,53 мкм – соответствует одинаковой концентрации ионов эрбия в сердцевине). б) Зависимость пиковой мощности и доли мощности отражённой ВРМБ от мощности накачки в разных ЭВУ.

Также в главе 2 показано, что основным способом увеличения эффективности в ЭВС с накачкой по оболочке является увеличение соотношения диаметров сердцевинной и оболочки. В данном случае на примере многомодовых ЭВС продемонстрирована возможность увеличения дифференциальной эффективности ЭВУ до 48,7% для излучения на длине волны 1565 нм и 41,5 % для 1535 нм. Указана область применения

разработанных многомодовых лазеров – резонансная накачка по оболочке для тулиевых и эрбиевых лазеров.

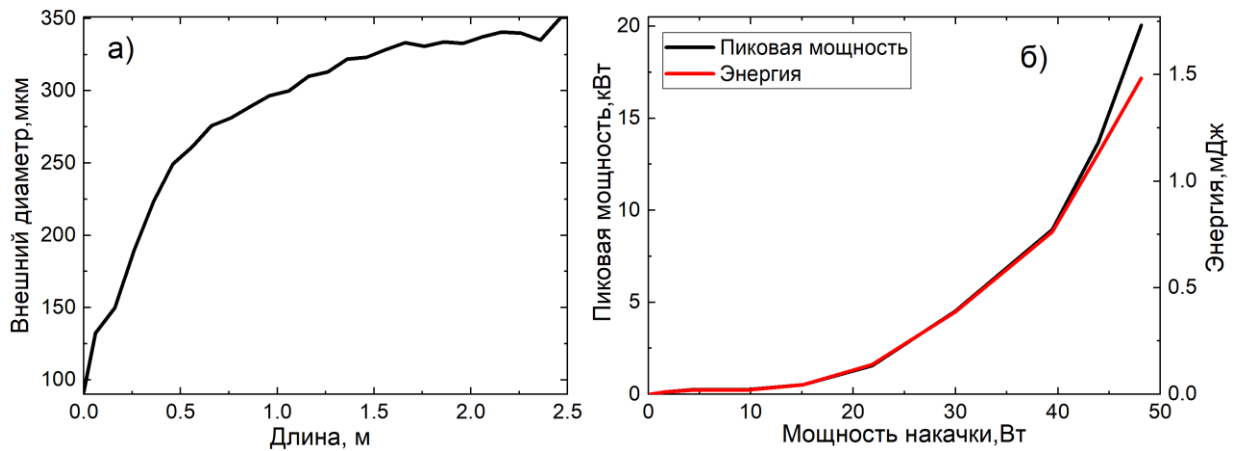


Рис. 2. а) Зависимость внешнего диаметра от длины конусного ЭВС. б) Пиковая мощность и энергия в зависимости от мощности накачки при усилении спектрально ограниченных импульсов длительностью 80 нс.

Помимо этого, в главе 2 показана возможность существенного повышения пиковой мощности без ухудшения качества пучка за счет использования конусного ЭВС. Диаметры сердцевины и оболочки в конусном ВС монотонно увеличиваются в несколько раз по длине, при этом тонкий конец имеет малый размер сердцевины и является одномодовым. Если изменение диаметра ВС достаточно плавное, то фундаментальная мода, возбужденная в конусном ВС со стороны тонкого конца, распространяется к толстому без перекачки энергии в высшие моды. Распределение внешнего диаметра по длине для реализованного конусного ЭВС представлено на рис. 2а). Максимальный внешний диаметр составил 350 мкм, диаметр сердцевины 86 мкм, расчётный диаметр поля фундаментальной моды на длине волны 1550 мкм – 53 мкм. Накачка ЭВС осуществлялась через толстый конец при помощи объемных элементов (линз и дихроичного зеркала). Параметр качества пучка M^2 в конусном ВС составил 1,26/1,27 для x и y осей соответственно. Было

продемонстрировано усиление спектрально-ограниченных импульсов длительностью 80 нс до пиковой мощности 20 кВт (рис. 2б).

В третьей главе исследовалась возможность увеличения эффективности ВУ с высокой пиковой мощностью за счет использования эрбий-иттербиевых ВС.

Проведен анализ недостатков ЭВУ и ЭИВУ с большой площадью моды и с накачкой по оболочке. Указано, что ЭВУ с накачкой по оболочке имеют низкую эффективность из-за большой доли непоглощённой накачки при оптимальной длине ЭВС (рис. 3а). Так, на оптимальной длине (максимальная мощность сигнала) более 25% накачки остаётся непоглощённой. Более того, рекордная пиковая мощность 4 кВт, достигнутая при усилении 100 нс спектрально-ограниченных импульсов была получена за счет уменьшения длины ЭВС до 1 м. Это увеличило долю непоглощенной накачки до 60% и снизило эффективности до 5%.

В свою очередь, недостатком ЭИВС с большой площадью моды является необходимость большой мощностью входного сигнала, требуемой для насыщения ЭИВС. На рис. 3б 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. 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. Стоит отметить, что схемы со встречной накачкой требуют меньшую входную мощность для насыщения ЭИВУ, однако дополнительная длина пассивного ВС (в объединителях сигнала и накачки) приводит к существенному ограничению максимальной пиковой мощности в полностью волоконном исполнении.

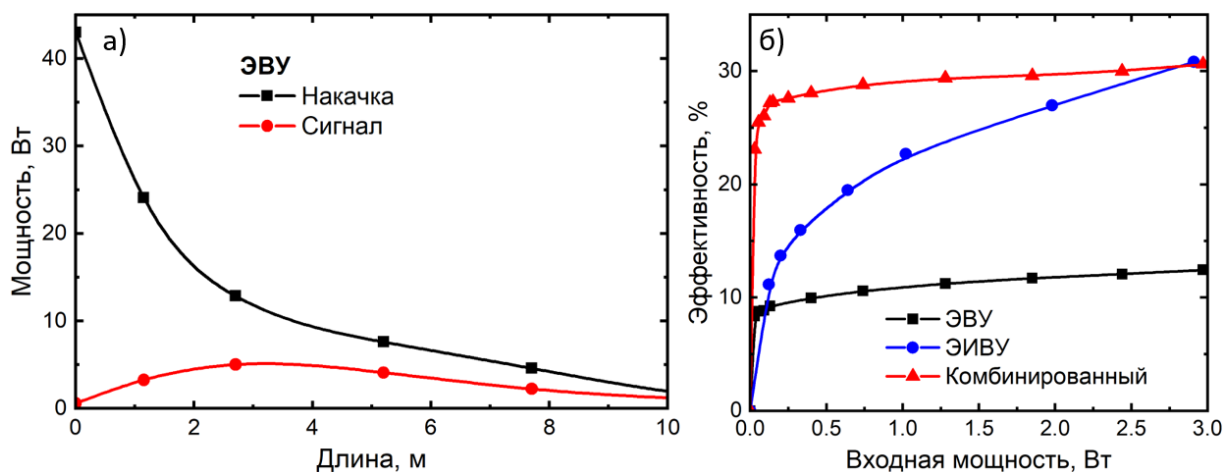


Рис. 3. а) Измеренные распределения накачки (976 нм) и сигнала (1557 нм) по длине ЭВУ на основе АФС ЭВС. б) Эффективность в зависимости от мощности входного сигнала на длине волны 1557 нм для 1,5-м ЭВУ, 0,5-м коммерчески доступного ЭИВУ Nufern LMA-EYDF-25P/300-HE и комбинированного усилителя, состоящего из 1,5-м ЭВС и 0,5-м ЭИВС.

Компенсировать слабое поглощение накачки в ЭВУ и требование большой входной мощности в ЭИВУ позволила предложенная в **третьей главе** схема комбинированного усилителя, состоящего из ЭИВС, приваренного непосредственно к выходному концу ЭВС (красная кривая на рис. 3б, схема на рис. 4а). В такой конфигурации ЭВС выполнял роль предусилительного каскада для ЭИВС, усиливая слабый входной сигнал (1–100 мВт) до нескольких Вт с высокой эффективностью по отношению к поглощённой мощности накачки. Накачка, оставшаяся непоглощенной после ЭВС, практически полностью поглощалась в ЭИВС, который работал в режиме насыщения с высокой эффективностью. Таким образом, весь ВУ имел высокую эффективность и высокое усиление. Дополнительное преимущество подхода комбинированного усилителя – разные составы сердцевины ЭВС и ЭИВС. Спектры усиления ВРМБ этих ВС не перекрываются, и порог ВРМБ всего усилителя определялся длиной активного световода, имеющего наименьший порог, а не суммарной длиной световодов.

Для создания комбинированного усилителя использовался ЭВС на основе АФС стеклянной матрицы и коммерчески доступный ЭИВС Nufem LMA-EYDF-25P/300-HE (именно с помощью данного световода были получены наилучшие результаты по пиковой мощности в ЭИВС). Оптимальная длина ЭИВС определялась по измерению выходной мощности сигнала при входной мощности сигнала 3 Вт и составила 0,5 м. 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 спектрально-ограниченных импульсов длительностью 70 нс по наблюдению начала импульсной нестабильности, выражающейся в осцилляциях вблизи заднего фронта импульса. При длине ЭВС 0,5 и 1 м порог ВРМБ остался неизменным и равен 4 кВт, поэтому было установлено, что пиковая мощность ограничивается порогом ВРМБ 4 кВт в 0,5 м ЭИВС. Оптимальной длиной ЭВС оказалась длина 1,5 м, при которой наблюдалось понижение порога ВРМБ до 3,7 кВт и рост эффективности до 26%. Дальнейшее увеличение длины ЭВС не привело к росту эффективности.

Для оценки максимальных характеристик оптимизированного усилителя был проведён эксперимент по усилению спектрально-ограниченных импульсов длительностью 160 нс. Результаты приведены на рис. 4. 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 рис. 4б). Другой критерий – более 0,1% отражённой из-за ВРМБ мощности (рис. 4в).

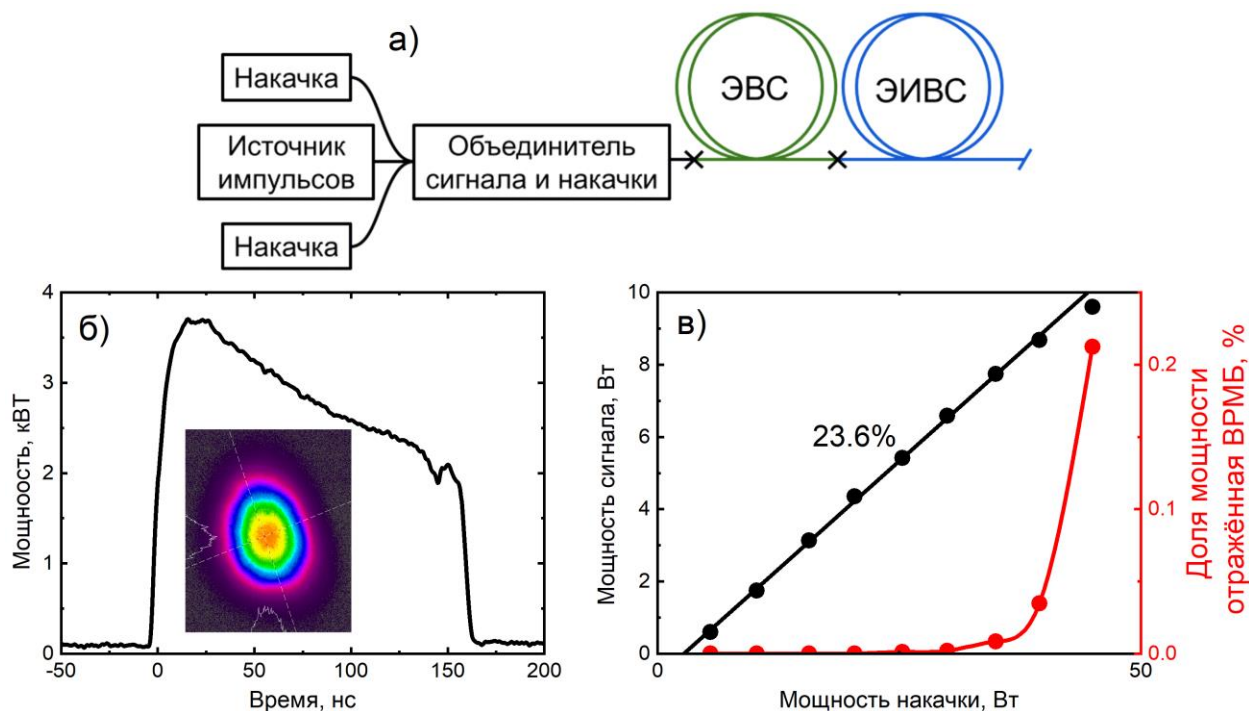


Рис. 4. а) Схема комбинированного усилителя. б) Форма импульса при максимальной мощности накачки в комбинированном усилителе; вставка – распределение интенсивности выходного излучения в дальнем поле, полученное камерой Spiricon SP-1550M. в) Энергия в импульсе и доля мощности, отражённой назад из-за ВРМБ.

Реализация ВУ с сохранением поляризации на основе схемы комбинированного усилителя вскрыла две проблемы. Первая заключалась в том, что существующие конструкции ЭИВС с увеличенным диаметром поля моды не являются одномодовыми. Такие конструкции основаны на концепции трехслойных световодов, когда сердцевина с большим показателем преломления окружена пьедесталом, имеющим меньший показатель преломления, для уменьшения её числовой апертуры. Технологически оказывается крайне сложно реализовать малую, соответствующую одномодовому режиму, разницу показателей преломления сердцевины и пьедестала, и сделать пьедестал достаточно большим для того, чтобы перекрытие его высших мод с сердцевиной было мало. В рамках

диссертационной работы исследовалось одно из возможных решений данной проблемы – создание ЭИВС на основе фосфоросиликатной стеклянной матрицы, высоколегированной фтором. Был разработан строго одномодовый на длине волны 1550 нм ЭИВС с большим полем моды и накачкой по оболочке. Одномодовость подтверждалась измерением параметра качества пучка M^2 , который оставался меньше 1,1 независимо от выходной мощности (вплоть до 20 Вт), в то время как в идентичных условиях для ЭИВС Nufern M^2 вырастал до величины, большей 2, с ростом мощности.

Второй проблемой оказалось то, что в созданном для практических применений усилительном модуле порог ВРМБ ограничивается нелинейностью пассивного ВС в выходных компонентах. При наличии всего двух выходных компонент, в силу ограничения на минимальную длину пассивного ВС сварочным аппаратом, порог ВРМБ снизился до 660 Вт. Дополнительные потери в пассивных компонентах привели к уменьшению порога ВРМБ до 330 Вт.

В главе 4 приведены результаты исследования способов повышения порога ВРМБ в пассивных ВС. Проведено исследование световодов с акустической антиволноводной структурой, показано подавление ВРМБ на 4,4 дБ по сравнению со стандартным телекоммуникационным ВС SMF-28 и указано на основное ограничение данного метода: максимальное подавление ВРМБ достигается при длине волны отсечки второй моды приблизительно в полтора раза меньше рабочей длины волны, что неприемлемо для случая ВС с большой площадью моды, так как низкая длина волны отсечки повышает их чувствительность к изгибу.

Для подавления ВРМБ в световодах с большой площадью моды был предложен новый подход: создание световодов, сердцевина которых содержит несколько акустических мод и её состав существенно меняется по радиусу. Работоспособность концепции была продемонстрирована сначала на примере

ВС с тремя равномерно легированными в разном соотношении оксидами алюминия и германия слоями. Так в световоде с большой числовой апертурой ($NA = 0,24$ $d_c = 3,5$ мкм) спектр ВРМБ разделялся на три пика приблизительно равной интенсивности, существенно отстоящих друг от друга. Было продемонстрировано максимальное подавление на 6,4 дБ по сравнению с SMF-28. Предложенный метод оказался применим и для световода с малой числовой апертурой ($NA = 0,075$ $d_c = 24$ мкм). Спектр ВРМБ такого ВС содержал два пика, относительные амплитуды которых зависели от диаметра световода, что привело к подавлению ВРМБ на 3,3 дБ. Дальнейшее развитие этого метода путём увеличения количества слоёв и увеличения акустического показателя преломления путем одновременного легирования внешних слоев оксидом германия и фтором (рис. 5б) позволило увеличить число акустических мод (рис. 5в) и достичь подавления ВРМБ на 4,8 дБ.

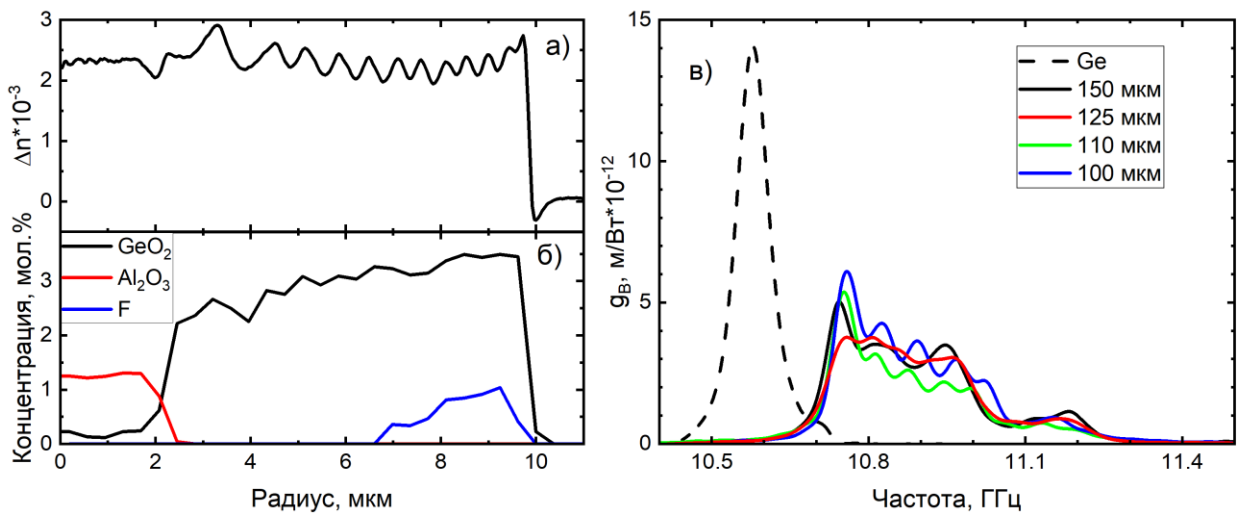


Рис. 5. а) Профиль показателя преломления ВС с малой числовой апертурой, б) его профили легирования, в) спектры ВРМБ.

Также в **Главе 4** впервые продемонстрирована возможность существенного увеличения степени подавления ВРМБ в световодах с высокой апертурой за счет объединения двух разных подходов – использования многослойной акустически-многомодовой сердцевины (в случае световодов с

большой апертурой это приводит к появлению нескольких существенно отстоящих друг от друга пиков в спектре усиления ВРМБ) и изменение деформации сердцевин по длине световода. Использование данного метода позволило добиться подавления ВРМБ на 10.5 дБ.

В **Заключении** сформулированы следующие основные результаты диссертации:

1. Впервые исследованы усилительные свойства эрбиевых волоконных световодов с большим диаметром поля моды (более 27 мкм для длины волны излучения 1555 нм) на основе фтор-германо-алюмо-силикатной (ФГАС) стеклянной матрицы с высоким содержанием оксида алюминия (до 3 мол.%) и низкой числовой апертурой сердцевин ($\sim 0,055$). Показано, что при накачке на длине волны 976 ± 1 нм по оболочке либо при работе в длинноволновой области (~ 1590 нм) использование ФГАС световодов позволяет увеличить эффективность преобразования накачки в сигнал по сравнению со световодами на основе алюмо-фосфорно-силикатной (АФС) стеклянной матрицы при сопоставимых геометрических характеристиках (диаметры сердцевин/оболочки, длина световода). Впервые продемонстрировано, что использование в волоконном усилителе с накачкой по оболочке активной среды, состоящей из двух последовательно соединенных отрезков (АФС и ФГАС) эрбиевых волоконных световодов, позволяет повысить порог ВРМБ более чем в полтора раза без снижения эффективности в сравнении с усилителем, реализованным только на одном из указанных световодов.

2. Достигнуты рекордно высокая эффективность и пиковая мощность в эрбиевых волоконных усилителях с накачкой по оболочке. В частности, за счет создания многомодового эрбиевого волоконного световода с увеличенным до 0,76 отношением диаметра сердцевин к диаметру оболочки была получена рекордно высокая (среди эрбиевых волоконных световодов, не содержащих иттербий и накачиваемых по оболочке) эффективность

преобразования излучения накачки в сигнал, превышающая 48%. Впервые исследован эрбиевый конусный волоконный световод, работающий в одномодовом режиме (параметр качества пучка $M^2 < 1,3$) при диаметре сердцевины более 53 мкм. С его помощью продемонстрирован рекордно высокий порог ВРМБ, превышающий 20 кВт для спектрально-ограниченных импульсов длительностью 55 нс.

3. Впервые продемонстрирована возможность достижения одновременно высокой эффективности (более 23%) преобразования излучения накачки в сигнальное излучение и высокой пиковой мощности (3,7 кВт) для спектрально-ограниченных импульсов длительностью около 160 нс за счет использования комбинированного эрбиевого/эрбий-иттербиевого волоконного усилителя. Эффективность усилителя в пять раз превышает эффективность, полученную при помощи других конструкций усилителей для спектрального диапазона 1.55 мкм с такой же выходной пиковой мощностью.

4. В пассивных волоконных световодах предложен новый метод подавления ВРМБ, основанный на создании многомодового акустического профиля путём изменения химического состава стекла по радиусу световода. Применение данного подхода позволило добиться подавления ВРМБ на 6,4 дБ для световода с увеличенной числовой апертурой сердцевины ($NA = 0,24$, $d_c = 3,2$ мкм) и на 4,8 дБ для световода с уменьшенной ($NA = 0,075$, $d_c = 20$ мкм). Показана возможность дальнейшего увеличения до 10,5 дБ порога ВРМБ в световоде с большой числовой апертурой ($NA = 0,17$, $d_c = 7,5$ мкм) за счет комбинации локального (путем создания многомодового акустического профиля) и дополнительного распределенного по длине световода (путём вариации деформации сердцевины) уширения спектра ВРМБ.

Публикации автора по теме диссертации

1. Худяков М. М., Лихачёв М. Е., Бубнов М. М., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Темянко 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. <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16011>
2. 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. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2748924>
 3. **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. Vol. 10083. P. 1008313. <https://doi.org/10.1117/12.2252797>
 4. **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. Vol.10512 P. 1051216. <https://doi.org/10.1117/12.2290837>
 5. **Khudyakov M. M.**, Lobanov A. S., Lipatov D. S., Abramov A. N., Vechkanov N. N., Gur'yanov A. N., Melkumov M. 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. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aaf7f8>
 6. **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. Vol. 10897 P. 108971X. <https://doi.org/10.1117/12.2510177>

7. **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. Vol. 10914 P. 109141R. <https://doi.org/10.1117/12.2508547>
8. **Khudyakov M. M.**, Yashkov M. V., Lipatov D. S., Abramov A. N., Vechkanov N. N., Bubnov M. M., Bobkov K. K., Guryanov A. N., Likhachev M. M. Cladding-pumped Er-doped (Yb-free) fibres with Al₂O₃-SiO₂ core highly doped with fluorine // Laser Phys. Lett. 2020. Vol. 17. № 1. P. 015101.
9. **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. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ab5d24>
10. **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. <http://dx.doi.org/10.1070/QEL17429>