

УТВЕРЖДАЮ:
Директор ИАиЭ СО РАН,
чл.-корр. РАН
Бабин Сергей Алексеевич

«20» _____ 2022 г.

М.П.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук
(ИАиЭ СО РАН)

на диссертационную работу Худякова Максима Маратовича
«Эрбиевые волоконные усилители с повышенным порогом вынужденного рассеяния
Мандельштама–Бриллюэна», представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.19– лазерная физика.

В настоящее время разработка перестраиваемых в ближнем и среднем ИК диапазонах волоконных лазерных источников является весьма **актуальной задачей**, которая имеет важное значение как для фундаментальных исследований, так и для многочисленных практических применений. В частности, поскольку в этот диапазон попадают "окна прозрачности" атмосферы, такие волоконные источники могут стать составной частью лидаров и оптических линий связи следующего поколения, а также применяться для мониторинга окружающей среды с помощью дистанционной спектроскопии. Предлагаемая диссертационная работа имеет **целью** разработку волоконных лазерных источников, перестраиваемых в среднем ИК диапазоне за счёт нелинейного преобразования длин волн в германатных и теллуридных световодах, а также разработку гибридной эрбий-тулиевой фемтосекундной лазерной системы, необходимой для их накачки. Проведённое исследование вносит значительный вклад в изучение эффектов нелинейного преобразования длин волн, таких как генерация суперконтинуума и перестраиваемых рамановских солитонов, в нелинейных световодах на основе оксидов германия и теллура.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 154 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 106 наименований.

Во введении изложены актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены

положения, выносимые на защиту и сведения об апробации полученных результатов.

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 волоконном усилителе (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 волоконного световода (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 эрбиевых волоконных световодах ЭВС с накачкой по оболочке. В частности, приведены результаты исследования зависимости эффективности эрбиевых волоконных усилителей ЭВУ от длины волны накачки и состава матрицы стекла сердцевины (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). Также в главе 2 показано, что основным способом увеличения эффективности в ЭВС с накачкой по оболочке является увеличение соотношения диаметров сердцевины 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. Помимо этого, показана возможность существенного повышения пиковой мощности при без ухудшения качества пучка за счет использования конусного ЭВС.

В **третьей главе** исследовалась возможность увеличения эффективности ВУ с высокой пиковой мощностью за счет использования эрбий-иттербиевых ВС. Проведен анализ недостатков ЭВУ и эрбий-иттербиевых волоконных усилителей (ЭИВУ) с большой площадью моды и с накачкой по оболочке. Компенсировать слабое поглощение накачки в ЭВУ и требование большой входной мощности в ЭИВУ позволила предложенная схема комбинированного усилителя, состоящего из эрбий-иттербиевого волоконного световода (ЭИВС), приваренного непосредственно к выходному концу ЭВС. Для оценки максимальных характеристик оптимизированного усилителя был проведён эксперимент по усилению спектрально-ограниченных импульсов длительностью 160 нс.

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

В заключении перечислены основные результаты проведенного диссертационного исследования.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, из которых 6 статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, и 4 статьи в сборниках трудов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в проведении исследования 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). 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. 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 результатов работы не вызывает сомнений.

Предложено одновременное использование двух типов ЭВС на основе алюмо-фосфоросиликатной (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. 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. Продемонстрирована 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. 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.

Полученные результаты представляют практический интерес в организациях, специализирующихся на разработке мощных лазерных систем, лидаров, а также на исследовании нелинейных взаимодействий в оптических волокнах. Результаты могут быть использованы в Научном центре волоконной оптики РАН, МГУ им. Ломоносова, Институте радиотехники и электроники РАН, Физическом институте РАН, Институте автоматики и электрометрии СО РАН, Институте лазерной физики СО РАН и других организациях.

Достоверность представленных результатов обусловлена использованием современных измерительных приборов и применяемых методов экспериментального и численного исследования, сопоставлением данных, полученных различными методами, апробацией результатов на международных конференциях и публикациями в ведущих рецензируемых журналах.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

По содержанию диссертационной работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. Не обсуждаются другие методы подавления ВРМБ, в том числе и более простые, а также их сравнение с методом, предложенным в диссертационной работе.

2. В диссертационной работе не приводится анализ необходимых лазерных характеристик для основного применения - в составе лидаров.

3. В работе не проведено систематическое исследование стабильности выходных характеристик разработанных узкополосных волоконных источников излучения.

Перечисленные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку работы и несколько не снижают ценность полученных результатов. Диссертационная

работа Худякова М. М. «Эрбиевые волоконные усилители с повышенным порогом вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна» является законченным научным исследованием и отвечает требованиям установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 02.08.2016 г.), а ее автор, Худяков Максим Маратович, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Доклад по диссертации заслушан на семинаре УНЦ «Квантовая оптика» «13» января 2022 г.

Отзыв составил старший научный сотрудник лаборатории волоконной оптики

Института автоматики и электрометрии СО РАН,

кандидат физико-математических наук

Кузнецов Алексей Геннадьевич



630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д.1, ИАиЭ СО РАН

Тел.: 8 (383) 330-79-69

E-mail kuznetsovAG@iae.nsk.su

Подпись Кузнецова А. Г. удостоверяю

учёный секретарь

Института автоматики и электрометрии СО РАН,

кандидат физико-математических наук

Донцова Е. И.



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук» (ИАиЭ СО РАН)

630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д.1, ИАиЭ СО РАН

Контактный телефон: 8 (383) 330-79-69

Интернет-сайт: www.iae.nsk.su, e-mail: iae@iae.nsk.su