РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ ИМ. А.М. ПРОХОРОВА

НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ ИМ. Е.М. ДИАНОВА

На правах рукописи

Ŋ

ХУДЯКОВ МАКСИМ МАРАТОВИЧ

ЭРБИЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ПОВЫШЕННЫМ ПОРОГОМ ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА

1.3.19 Лазерная физика

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Лихачев М.Е.

Москва – 2021

Благодарности
Сокращения
Введение
Глава 1. Волоконные усилители с высоким порогом ВРМБ для спектральной
области вблизи 1,55 мкм (обзор литературы) 19
1.1.Уровни ионов эрбия в кварцевом стекле19
1.2.Влияние матрицы стекла на эффективность волоконных усилителей 22
1.3.Эрбий-иттербиевые волоконные усилители 25
1.4.Сравнение схем усилителей28
1.4.1.Эрбий-иттербиевые усилители с накачкой по оболочке на
915-980 нм
1.4.2.Эрбиевые волоконные усилители с накачкой по оболочке на
976 нм 30
1.4.3.Эрбиевые волоконные усилители с накачкой по сердцевине на
1480 нм 31
1.4.4.Эрбиевые волоконные усилители с накачкой в пик поглощения
перехода ⁴ I _{15/2} → ⁴ I _{13/2} 32
1.4.5.Накачка эрбиевых волоконных усилителей по сердцевине на
980 нм 34
1.4.6.Вывод
1.5.Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна в волоконных
световодах
1.6.Способы повышения порога вынужденного рассеяния Мандельштама-
Бриллюэна в волоконных световодах путём создания градиента
резонансной частоты по длине
1.6.1.Градиент концентрации легирующей добавки
1.6.2.Градиент температуры41

1.6.3.Градиент деформации	42
1.7.Способы повышения порога вынужденного рассеяния Мандельштам	ла-
Бриллюэна за счёт модификации акустического профиля волоконного	
световода	43
1.8.Выводы	47
Глава 2. Эрбиевые волоконные усилители с накачкой по оболочке	48
2.1.Эрбиевый волоконный усилитель с фтор-германий-алюмосиликатно	й
матрицей	48
2.2.Многомодовый эрбиевый волоконный усилитель	59
2.3.Эрбиевый волоконный усилитель на основе световода-конуса	66
2.4.Выводы	71
Глава 3.Эрбий-иттербиевые волоконные усилители	73
3.1.Эрбий-иттербиевые волоконные усилители с накачкой по оболочке.	73
3.2.Недостатки присущие волоконным усилителям на основе эрбиевых	И
эрбий-иттербиевых волоконных световодов	86
3.3.Комбинированный эрбиевый/эрбий-иттербиевый усилитель	89
3.4.Комбинированный эрбиевый/эрбий-иттербиевый усилитель с	
сохранением поляризации	98
3.5.Выводы	. 105
Глава 4. Подавление вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэн	на в
пассивных волоконных световодах	. 106
4.1.Волоконный световод с антиволноводным акустическим профилем.	. 107
4.2.Волоконный световод с несколькими пиками в спектре вынужденно	ГО
рассеяния Мандельштама-Бриллюэна	. 117
4.2.1.Волоконный световод с малым полем моды	. 118
4.2.2.Волоконный световод с большим диаметром поля моды	. 122
4.2.3.Волоконный световод с многослойной сердцевиной	. 127

4.3.Комбинированный метод подавления вынужденного рассеяния	
Мандельштама-Бриллюэна	129
4.3.1.Волоконный световод со смещённой сердцевиной	130
4.3.2.Комбинированный метод подавления вынужденное рассеяния	
Мандельштама-Бриллюэна	134
4.4.Выводы	139
Заключение	141
Список литературы	143

Благодарности

Автор выражает признательность директору НЦВО им. Е.М. Дианова С. Л. Семёнову за поддержку, постоянный интерес и внимание к работе.

Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю, заведующему лабораторией «Специальных волоконных световодов», М. Е. Лихачёву и ведущему научному сотруднику М.М. Бубнову за постановку задачи, всестороннюю поддержку и неоценимую помощь в работе.

Также автор хочет поблагодарить сотрудников НЦВО РАН А. К. Михайлова, А. Е. Левченко и А. В. Лобызова за вытяжку световодов; А. Н. Денисова и В. В. Вельмискина за подготовку к вытяжке заготовок световодов; О. И. Медведкова за изготовление брэгговских волоконных решеток; С. С. Алёшкину и Т. А. Кашайкину за проведение измерения профилей показателя преломления в заготовках и световодах; К. К. Бобкова за оказанную помощь в проведении экспериментов; А. Г. Климанова за обработку заготовок световодов и подготовку заготовок световодов для проведения микроанализа; Л. Д. Исхакову за проведение микроанализа заготовок и световодов; сотрудников ИХВВ РАН Д. С. Липатова, А. С. Лобанова, М.В. Яшкова и А. Н. Гурьянова за изготовление заготовок световодов; сотрудников ИРЭ РАН А.А. Рыбалтовского и О.В. Бутова за предоставленные длинные брэгговские решётки.

Сокращения

- АС алюмосиликатный (Al₂O₃-SiO₂)
- АФС алюмофосфоросиликатный (Al₂O₃-P₂O₅ -SiO₂)
- АОМ акустооптический модулятор
- ВБР волоконная брэгговская решётка
- ВЛ волоконный лазер
- ВРМБ вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна
- ВС волоконный световод
- ВУ волоконный усилитель
- ДЗ дихроичное зеркало
- ИИ источник импульсов
- ЛД лазерный диод
- ММ многомодовый
- ППП профиль показателя преломления
- ПУ полупроводниковый усилитель
- РЗЭ редкоземельный элемент
- ССО спектрально селективный ответвитель (WDM)
- УВОМ устройство для вывода оболочечных мод
- УСЛ усиленная спонтанная люминесценция
- ФГАС фтор-германоалюмосиликатный (F-GeO₂-Al₂O₃-SiO₂)

ФС – фосфоросиликатный (P₂O₅-SiO₂)

ФтАС – фтор-алюмосиликатный (F-Al₂O₃)

ЭВС – волоконный световод с сердцевиной, легированной оксидом эрбия

ЭВУ – эрбиевый волоконный усилитель

ЭИВС – волоконный световод с сердцевиной, легированной оксидами эрбия и иттербия

ЭИВУ – эрбий-иттербиевый волоконный усилитель

ЭОМ – электрооптический модулятор

ЭПВ – эффективность передачи возбуждения

Эффективность – дифференциальная эффективность преобразования излучения накачки в сигнальное излучение

Δn – разница показателей преломления с нелегированным кварцевым стеклом

MCVD - modified chemical vapor deposition (модифицированное осаждение из газовой фазы)

Введение

ЭВУ 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 ЭВУ обеспечило передачу оптического сигнала на дальние дистанции (тысяча километров и более) без использования регенераторов оптический преобразуется (устройств. где сигнал 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, близкая К квантовому пределу, а также продемонстрирована высокая выходная мощность, гарантировано перекрывающая потребности оптических линий связи. Данные факторы привели к активному развитию альтернативных применении 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 [1]), и поэтому оно подходит для применений. К атмосферных таким задачам относятся, например. дистанционное измерение скорости ветра при помощи доплеровского лидара (LIDAR — LIght Detection And Ranging) [2,3] и измерение концентрации CO₂ в газовом столбе [4,5]. 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 ВЛ.

Нелинейным эффектом с наименьшим порогом в таких условиях является ВРМБ.

Достижение высокой пиковой мощности и эффективности в ЭВУ и ЭВЛ 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 ЭВУ, достигаемое уменьшением длины 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 ЭИВУ, которые позволили существенно увеличить площадь моды и сократить оптимальную длину ЭИВС в усилителе. Однако ни в одном из случаев не удалось получить высокую эффективности 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 BC и компоненты на их основе для доставки мощного излучения. Это приводит к дополнительной нелинейности, связанной с распространением излучения с высокой пиковой мощностью по таким BC. В связи с этим разработка пассивных BC с повышенным порогом BPMБ является актуальной задачей для увеличения пиковой мощности BУ, используемых в лидарах.

Цель диссертационной работы:

Целью диссертационной 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.

Задачи диссертационной работы:

- Исследование влияния стеклянной матрицы сердцевины эрбиевого волоконного световода, длины волны накачки и его геометрии на эффективность усиления и максимально достижимый порог ВРМБ.
- 2. Разработка и исследование одномодового ЭИВС с увеличенной площадью поля моды, накачкой по оболочке и большой эффективностью усиления.
- 3. Поиск новых подходов к созданию высокоэффективных ВУ с высокой пиковой мощностью в спектральной области вблизи 1,55 мкм.
- 4. Исследование методов повышения порога ВРМБ в пассивных волоконных световодах.

Научная новизна работы:

 Проведено исследование свойств новой ФГА) 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).

- Впервые показано, что использование ЭВС и ЭИВС в одном комбинированном усилителе позволяет объединить достоинства этих типов ВС – высокий коэффициент усиления в ЭВС и высокую эффективность 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 ВС.

Практическая значимость работы

- Предложено одновременное использование двух типов ЭВС на основе 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.
- 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.

4. Разработана конструкция комбинированного эрбиевого/эрбийиттербиевого ВУ, позволившая получить рекордную эффективность 23 % для полностью волоконных усилителей спектрально-ограниченных наносекундных импульсов с пиковой мощностью более 3,7 кВт.

Защищаемые положения

- Одновременное использование двух типов ЭВС с разными матицами стекла сердцевины (АФС и ΦГАС) 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.
- 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 M2 < 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 спектральноограниченных 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)

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; 8 докладах на всероссийских конференциях: Всероссийская конференция по волоконной оптике 2015,2017,2019,2021, Российский семинар по волоконным лазерам 2016, 2018, 2020; на семинарах НЦВО РАН, а также опубликованы в 7 статьях, 6 из которых входят в список ВАК.

Структура работы

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

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Журнальные статьи:

1. Худяков М. М., Лихачёв М. Е., Бубнов М. М., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Темянко В., Нагел Д., Пейгамбариан Н. Оптимизация акустической антиволноводной структуры для повышения порога ВРМБ в

волоконных световодах // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 5. С. 468– 472.

- 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.
- 3. 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.
- 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.
- 5. 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.
- 6. 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.
- Худяков М. М., Алексеев В. В., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Темянко В., Бубнов М. М., Лихачёв М. Е. Волоконный световод со смещённой сердцевиной для подавления ВРМБ // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. № 3. С. 228–231.

Доклады на конференциях:

- Худяков М. М., Лихачёв М. Е., Бубнов М. М., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Темянко В., Нагел Д., Пейгамбариан Н. Измерение порога ВРМБ в световодах с акустической антиволноводной структурой // Всероссийская конференция по волоконной оптике (Фотон-экспресс). г. Пермь: , 2015. С. 258–259.
- Худяков М. М., Лихачёв М. Е., Бубнов М. М., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н. Световод с трёхслойной сердцевиной для повышения порога вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна // Российский семинар по волоконным лазерам. г. Новосибирск: , 2016. С. 113–115.
- 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.
- 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.
- 5. Худяков М. М., Бубнов М. М., Сенаторов А. К., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Рыбалтовкий 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 11. 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.
- 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.
- 13. 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-modearea Er-Yb fiber // Proc. SPIE, 2019. P. 109141R.
- 14. Khudyakov M. M., Lipatov D. S., Gurayanov 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, 2019, P. 1–1.

- 15. 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 20. 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.
- 21. Khudyakov M. M. Progress in monolithic high peak power Er-doped fiber amplifiers // AFL., 2019. Invited.
- Khudyakov M. M., Alekseev V. 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.

- 23. Худяков М. М., Алексеев В. В., Липатов Д. С., Гурьянов А. Н., Темянко В., Бубнов М. М., Лихачёв М. Е. Волоконный световод со смещённой сердцевиной для подавления ВРМБ // Российский семинар по волоконным лазерам. С. 160–161.
- 24. Худяков М. М., Цветков С. В., Косолапов А. Ф., Бубнов М. М., Лобанов А. С., Гурьянов А. Н., Лихачёв М. Е. Световод со смещённой сердцевиной и оптимизированным акустическим профилем для подавления ВРМБ // Всероссийская конференция по волоконной оптике (Фотон-экспресс)., 2021. С. 40–41.

Глава 1. Волоконные усилители с высоким порогом ВРМБ для спектральной области вблизи 1,55 мкм (обзор литературы)

1.1. Уровни ионов эрбия в кварцевом стекле

Ионы эрбия в кварцевом стекле обладают рядом полос поглощения в видимом и ближнем ИК диапазонах. На рисунке 1 показаны схема уровней ионов эрбия в кварцевом стекле и спектр оптических потерь, измеренный в BC, легированном оксидом эрбия, приведенные в [6]. Наиболее интересным с практической точки зрения генерации лазерного излучения является уровень ⁴I_{13/2}, время жизни на котором составляет ~ 10 мс (слегка изменяется в зависимости от состава стекла). Переход электронов с уровня ⁴I_{13/2} на уровень ⁴I_{15/2} обеспечивает генерацию излучения на длине волны ~1550 нм. Стоит отметить, что вследствие большого расстояния между уровнями ⁴I_{13/2} и ⁴I_{15/2}, населенность первого в невозбужденном состоянии практически равна нулю. Возбуждение электронов на этот уровень возможно путем накачки излучением в любую из вышележащих полос (откуда электроны, как правило, безызлучательно релаксируют на уровень ⁴I_{13/2}), либо непосредственно в коротковолновый край полосы ⁴I_{13/2}.

Наличие вышележащего уровня ${}^{4}I_{9/2}$, расстояние до которого от уровня ${}^{4}I_{13/2}$ совпадает с расстоянием между уровнями ${}^{4}I_{13/2}$ и ${}^{4}I_{15/2}$, делает возможным процесс кооперативной апконверсии между двумя ионами эрбия. Схема этого процесса изображена на рисунке 2. Ион эрбия на уровне ${}^{4}I_{13/2}$ может провзаимодействовать с другим таким же возбуждённым на уровень ${}^{4}I_{13/2}$ ионом. При таком взаимодействии один из ионов – донор переходит в невозбуждённое состояние на уровень ${}^{4}I_{15/2}$, а другой – акцептор – на уровень ${}^{4}I_{9/2}$. После чего посредством безизлучательного многофононного процесса ион-акцептор релаксирует последовательно на уровни ${}^{4}I_{11/2}$ и ${}^{4}I_{13/2}$. Излучение фотона на длине волны 980 нм с уровня ${}^{4}I_{11/2}$ – маловероятный процесс. Таким образом, кооперативная апконверсия приводит к потере фотона накачки и уменьшению эффективности ЭВС.



Рисунок 1. а) Схема энергетических уровней ионов эрбия в кварцевом стекле; б) измеренный спектр оптических потерь в германо-алюмо-силикатном ЭВС, поглощение в области 400-600 нм уменьшено в 10 раз, осцилляции в области 1100 нм соответствуют отсечке первой высшей моды ВС [6].



Рисунок 2. Схема кооперативной апконверсии между двумя ионами эрбия.

Вероятность кооперативной апконверсии зависит от расстояния между ионами эрбия. В ряде работ [7,8] показано, что снижение эффективности ЭВС не может быть корректно описано только за счет апконверсии между равномерно распределенными ионами эрбия. Доля ионов, зависящая от их концентрации, находится кластерах-группах В ИЗ нескольких близкорасположенных ионов. Дело в том, что, несмотря на все свои достоинства, такие как прозрачность, стабильность и прочность, кварцевое стекло является плохим растворителем для РЗЭ. Для координирования одного иона РЗЭ в матрице стекла требуется 6-8 ионов кислорода [9]. В то же время в чистом кварцевом стекле очень мало дефектов типа немостикового кислорода и, как следствие, в нем эффективно растворяется лишь небольшая часть ионов РЗЭ. Для компенсации заряда ионам РЗЭ энергетически выгодно объединяться в кластеры, таким образом разделяя ионы кислорода между собой. Расстояние между ионами эрбия в кластерах сравнимо с ионным диаметром и составляет ~0.2 нм, в то же время расстояние между равномерно распределенными ионами эрбия более чем на порядок больше. В результате, время взаимодействия между кластеризованными ионами эрбия находится в субмикросекундном диапазоне, а для статистически распределенных ионов - в миллисекундном [10]. Таким образом, кооперативная апконверсия, вызванная

кластеризацией ионов эрбия – основная причина, приводящая к уменьшению эффективности ЭВС с большой концентрацией эрбия.

1.2. Влияние матрицы стекла на эффективность волоконных усилителей

Как упоминалось выше, чистое кварцевое стекло – плохой растворитель для РЗЭ, что приводит кластеризации ионов эрбия при увеличении его концентрации и падению эффективности ЭВС. Доля кластеризации ионов эрбия зависит от состава стекла сердцевины ЭВС [11,12]. Использование стандартной для пассивных ВС германосиликатной матрицы стекла сердцевины не позволяет увеличить растворимость кластеров эрбия. Дело в том, что добавка германия практически не нарушает сетку кварцевого стекла и, как следствие, не увеличивает количество дефектов типа немостикового кислорода. Так, в работе [13] эффективность преобразования накачки на 980 нм в сигнал при концентрации ионов эрбия 0,003 мол.% составила 55 %, а при повышении до всего 0,025 мол.% упала до 6,8 % для германосиликатной матрицы стекла сердцевины.

На сегодняшний день наиболее распространенными добавками, использующимися для подавления кластеризации эрбия в кварцевом стекле, являются алюминий и фосфор. Добавка этих лигандов позволяет ионам эрбия легче встраиваться в сетку кварцевого стекла без кластеризации [14,15]. В работе [12] была изучена зависимость эффективности ЭВУ от концентрации эрбия и состава стекла сердцевины. На рисунке 3 приведены результаты данной работы. Видно, что АС матрица, даже при низкой концентрации алюминия, позволяет достичь большей эффективности по сравнению с ФС матрицей. Это соответствует лучшей растворимости кластеров эрбия в ВС с АС матрицей.



Рисунок 3. Зависимость дифференциальной эффективности от концентрации эрбия [12] для BC с разным составом сердцевины диаметром ~10 мкм. Линии 1 и 2 соответствуют BC с низкой (~1,5 %) и высокой (3-20 %) концентрацией алюминия, 3 - ФС BC, 4 - АФС BC с небольшим избытком фосфора или алюминия.

Стоит отметить, что добавка оксида алюминия или фосфора увеличивает показатель преломления стекла сердцевины. Данный факт ограничивает возможность создания одномодовых ЭВС с большим диаметром сердцевины и, одновременно, высокой эффективностью. На рисунке 3 видно, что снижение концентрации алюминия с 3 до 1.5 мол.% приводит к значительному эффективности работы ЭBС. По этой причине более ухудшению перспективной матрицей стекла сердцевины является ФтАС. Добавка F позволяет понизить показатель преломления и сохранить одномодовость для большей сердцевины при фиксированной концентрации алюминия. На начало работы над диссертацией, в силу технологических ограничений, при одновременном вводе большого количества алюминия и фтора концентрация последнего ограничивается 1 вес.%. Это накладывает ограничения на концентрацию алюминия, зависящие от диаметра сердцевины ВС. Для ВС с диаметром сердцевины 34 мкм максимальная концентрация алюминия составляет 1,5 мол.% [16]. ВС с такой сердцевиной работал в одномодовом режиме за счёт слабого изгиба (радиус изгиба ~ 35 см). При концентрации Er₂O₃ 0,05 мол.% была продемонстрирована эффективность 40 % в ЭВС длиной 45 м.

Другая матрица, позволяющая повысить растворимость ионов эрбия без существенного роста показателя преломления – АФС. Было показано, что при одновременном легировании оксидами алюминия и фосфора в сетке стекла образуются структурные группы AlPO₄, свойства которых близки к свойствам молекул SiO₂ [17]. При этом показатель преломления такого стекла при эквимолярном соотношении оксидов алюминия и фосфора оказывается даже ниже, чем у чистого кварцевого стекла. Профиль показателя преломления ВС в данном случае может быть задан небольшим избытком алюминия либо фосфора. В работе [12] были исследованы свойства таких ВС с малым диаметром поля моды и накачкой по сердцевине (линия 4 на рисунке 3). Видно, что растворимость ионов эрбия в данном случае несильно уступает ВС с высокой концентрацией алюминия. Ситуация изменяется для ВС с большим диаметрам поля моды, где концентрация алюминия в ФтАС матрице оказывается ограниченной. В результате АФС матрица в таких ВС приводит к большей растворимости ионов эрбия при его больших концентрациях. Это подтверждается расчётами для диаметра сердцевины 35 мкм в [18], результаты которых приведены на рисунке 4. По этой причине АФС матрица является предпочтительной для ВУ с большой пиковой мощностью. При помощи ЭВС с такой матрицей была продемонстрирована максимальная пиковая мощность

для импульсов спектрально ограниченных импульсов длительностью 55 нс в спектральной области 1,5-1,6 мкм – 4 кВт [19].



Рисунок 4. Рассчитанные эффективность и доля ионов Er³⁺ в кластерах от концентрации Er₂O₃ для ЭВС с ФтАС с низкой концентрацией алюминия (штриховая линия) и АФС (сплошная линия) с диаметром сердцевины/оболочки 35/125 при накачке по оболочке на длине волны 976 нм [18].

1.3. Эрбий-иттербиевые волоконные усилители

Для генерации излучения в спектральной области около 1,5 мкм кроме ВС, легированных только эрбием, также применяют ВС, легированные одновременно эрбием и иттербием – ЭИВС. В таких ВС ионы иттербия выступают в роли сенсибилизатора, который поглощает излучение накачки и передаёт его ионам эрбия. Этот процесс возможен из-за равенства энергий уровней ²F_{5/2} иттербия и ⁴I^{11/2} эрбия (см. рисунок 5а). Использование иттербия 25 в качестве сенсибилизатора несёт в себе три главных преимущества: вопервых, ширина полосы поглощения иттербия в области 0,9-1 мкм в несколько раз превышает ширину полосы поглощения эрбия, что позволяет использовать дешёвые нестабилизированные по длине волны диоды накачки в спектральной области 910-950 нм без потери эффективности; во-вторых, сечение поглощения ионов иттербия на порядок превышает сечение поглощения ионов эрбия на длине волны 976 нм (см. рисунок 5б)), что позволяет использовать более короткие ВС при накачке в пик поглощения иттербия и увеличивает порог нелинейных эффектов в ЭИВУ; в-третьих, для ионов иттербия не существует процесса кооперативной апконверсии из-за отсутствия уровней выше ${}^{2}F_{5/2}$, что убирает ограничения на максимальную концентрацию иттербия и позволяет создавать ВС с очень короткой оптимальной длиной (вплоть до 10-15 см. [20,21]). К ещё одному, менее значимому, преимуществу солегирования сердцевины ВС иттербием можно отнести уменьшение кластеризации эрбия [22]. Дело в том, что ионы разных РЗЭ имеют близкий радиус и занимают одинаковые вакансии в сетке стекла сердцевины. По этой причине кластеры могут состоят из ионов разных РЗЭ. В случае ЭИВС, в которых типичное отношение концентраций ионов иттербия к ионам эрбия превышает 3, практически все ионы эрбия находятся в отдельных кластерах с одним или более ионами иттербия.



Рисунок 5. а) схема уровней в системе Er-Yb; б) сечения поглощения и излучения ионов Er³⁺ и Yb³⁺ в спектральной области 850-1150 нм [23]

1.4. Сравнение схем усилителей

Существует два основных способа накачки активных ВС: по сердцевине и по оболочке. В первом случае излучение накачки вместе с излучением сигнала распространяются по сердцевине ВС. Во втором – излучение накачки распространяется по кварцевой оболочке и поглощается сердцевиной активного ВС. При этом, для создания волноводных условий для излучения накачки такие ВС покрываются отражающим полимером или имеют вторую стеклянную оболочку пониженным показателем преломления. с Преимуществом первого способа является существенно большее (примерно в A_{об}/A_с раз, где A_{об} – площадь оболочки, A_с - сердцевины) поглощение накачки, что приводит к меньшей длине активного ВС. Ещё одним преимуществом такой накачки является то, что накачка распространяется в фундаментальной моде и имеет максимальный интеграл перекрытия с фундаментальной модой сигнала. Это позволяет получать одномодовое излучение на выходе из маломодовых ВУ [24]. Преимуществом второго способа накачки является возможность использования источников накачки с существенно меньшей яркостью, но на порядок большей мощностью. Таким образом в подавляющем большинстве современных ВУ и ВЛ с высокой средней мощностью (> 1 Вт) применяется накачка по оболочке.

Из всех полос поглощения ионов эрбия в кварцевом стекле для накачки лазеров в большинстве случаев используется полоса поглощения на 980 нм и коротковолновый край полосы с максимумом поглощения в районе 1530 нм. Данный факт прежде всего связан с наличием эффективных источников накачки на данных длинах волн. Также дальнейшее уменьшение длины волны накачки, например, при использовании лазерных диодов в области 800 нм, приводит к снижению эффективности работы ЭВС и увеличению его нагрева в силу увеличивающегося квантового дефекта. Накачка ЭИВС как правило осуществляется либо в пик поглощения иттербия на 976 нм при помощи

стабилизованных по длине волны диодных модулей накачки либо в коротковолновый край полосы поглощения 910-950 нм.

Важно отметить, что оптимизация ВУ для увеличения эффективности/ средней мощности и оптимизация для достижения максимальной пиковой мощности – две во многом противоречащие друг другу задачи. Так, для максимальной эффективности средней достижения И мощности предпочтительно использовать большие длины ВС с малой концентрацией эрбия для уменьшения влияния кластеризации и обеспечения более эффективного теплоотвода. С другой стороны, увеличение пиковой мощности ВУ требует минимизации длины активного ВС, что сопровождается уменьшением эффективности в силу большей концентрации эрбия и/или меньшего поглощения накачки. Одной из целей диссертационной работы является разработка усилителя с одновременно высокой эффективностью и высокой пиковой мощностью. В связи с этим далее приведено рассмотрение различных схем накачки ВУ и ВЛ с точки зрения эффективности и достигнутых средних и пиковых мощностей для спектрально ограниченных наносекундных импульсов, а также приведены преимущества и недостатки каждой схемы.

1.4.1. Эрбий-иттербиевые усилители с накачкой по оболочке на 915-980 нм

В настоящий момент ЭИВС с накачкой по оболочке – основной способ повышения средней выходной мощность ВУ и ВЛ в спектрально области вблизи 1,55 мкм. Использование ЭИВС с накачкой по оболочке позволило получить наибольшую на момент написания диссертационной работы мощность и эффективность в непрерывном режиме в спектральной области 1.5-1.6 мкм для одномодового излучения – 302 Вт и 56% [25]. В то же время максимальная пиковая мощность для одномодовых спектрально ограниченных наносекундных импульсов в ЭИВС составляет 3,5 кВт при эффективности всего 3,3% [26].

ЭИВС имеют ряд недостатков. Самый большой из них – паразитная генерация ионов иттербия в спектральной области 1-1,1 мкм. Она вызвана насыщением процесса передачи энергии от ионов иттербия к ионам эрбия, что приводит к росту инверсии ионов иттербия и быстрому росту УСЛ иттербия [27,28]. Это пороговый эффект зависящий от параметров ЭИВС и длины волны накачки. Преодоление данного порога приводит к уменьшению эффективности и делает такие ЭВУ опасными для глаз [29]. Кроме того, при наличии достаточного усиления для люминесценции ионов иттербия возможно развитие лазерной генерации, что может повредить компоненты усилителя и вывести его из строя.

К не менее значимому недостатку можно отнести ухудшение эффективности ЭИВУ при попутном распространении накачки и сигнала [28]. По этой причине ЭИВУ для импульсов с высокой пиковой мощностью либо имеют низкую эффективность при попутной накачке [30], либо, при встречной накачке и полностью волоконном исполнении, их пиковая мощность ограничивается волоконными компонентами на выходе ЭИВС (точнее – ВС в объединителе накачки и сигнала).

1.4.2. Эрбиевые волоконные усилители с накачкой по оболочке на 976 нм

В настоящее время самая высокая пиковая мощность 4 кВт для спектрально ограниченных импульсов длительностью 63 нс в области длин волн вблизи 1,55 мкм была продемонстрирована в ЭВУ с попутной накачкой по оболочке на длине волны 976 нм [31]. Такая высокая пиковая мощность была получена за счёт снижения эффективности с 40% для непрерывного сигнала [16] до 5%. Причинами такой низкой эффективности являются большая концентрация эрбия (0,1 мол.% [32] против 0,017 мол.% в [16]) и малое поглощение накачки при короткой длине ВС. Так, в конфигурации ВУ, при которой была получена пиковая мощность 4 кВт, 1 м ЭВС поглотил только 25 % введённой мощности накачки. При длине ЭВС 3 м 70 % мощности

30

накачки было поглощено, что привело к увеличению эффективности до 12 %, однако пиковая мощность уменьшилась до 1 кВт.

Порог ВРМБ, ограничивающий максимальную пиковую мощность ВУ с узкой спектральной шириной, зависит от эффективной длины ВС. Она определяется распределением мощности сигнала по длине ВУ. Таким образом, схемы накачки с разным распределением сигнала по длине активного ВУ приводят к разному порогу ВРМБ для одной и той же длины ВС. Альтернативой попутной накаче является накачка навстречу, где излучение сигнала и накачки распространяются в противоположенных направлениях. Использование такой схемы накачки позволило увеличить длину ЭВС до 6 м без уменьшения порога ВРМБ [33]. Это привело к увеличению эффектиности до 16,5%.

1.4.3. Эрбиевые волоконные усилители с накачкой по сердцевине на 1480 нм

Альтернативой накачке по оболочке является накачка по сердцевине. Чаще всего такая накачка происходит на длине волны 1480 нм в силу простоты получения такого излучения в ВС с малой апертурой сердцевины при помощи ВУ, основанных на вынужденном комбинационном рассеянии. В таких ВУ происходит многокаскадное преобразование длины волны от излучения иттербиевого ВЛ на 1117 нм до 1480 нм. При этом максимальная эффективность и мощность такого ВУ составляют 42 % и 301 Вт [34]. Важно отметить, что эффективность приведена как отношение мощности излучения на 1480 нм к мощности диодов накачки на 975 нм.

Преимуществом такой накачки является низкий квантовый дефект и близкий модовый состав сердцевины ЭВС для излучения сигнала и накачки. Первое обеспечивает малую тепловую нагрузку и высокую эффективность. Второе позволяет использовать такую накачку в маломодовых ЭВС для получения избирательного усиления фундаментальной моды за счёт её

большего перекрытия с модой накачки [24]. Так в ЭВС с диаметром сердцевины 70 мкм (диаметр поля моды 47,4 мкм) было получено усиленное излучение с параметром качества пучка М² равным 1,04/1,06 [35].

Максимальная продемонстрированная эффективность при таком способе накачки составила 71 % при средней мощности 101 Вт [36]. Если рассчитывать эффективность беря за основу мощность полупроводниковых диодов накачки, то она составила 30 %, что уступает эффективности, полученной в ЭИВС. Максимальная пиковая мощность для спектрально ограниченных наносекундных импульсов продемонстрированная с использованием такой схемы накачки составила 700 Вт с эффективностью 29,3 % относительно мощности одномодовой накачки на 1480 нм (12,3 % относительно многомодовых накачек в области 976 нм) [37].

1.4.4. Эрбиевые волоконные усилители с накачкой в пик поглощения перехода ⁴I_{15/2} → ⁴I_{13/2}

Накачка ЭВС и ЭИВС возможна в максимум полосы поглощения перехода ${}^{4}I_{15/2} \rightarrow {}^{4}I_{13/2}$ на длине волны 1535 \pm 5 нм в зависимости от матрицы стекла сердцевины. Такая накачка обеспечивает минимальный квантовый дефект, что позволяет в теории получить эффективность ~ 95 %. На практике эффективность ограничивается кластеризацией эрбия, так как при накачке в пик поглощения перехода ${}^{4}I_{15/2} \rightarrow {}^{4}I_{13/2}$ вероятность апконверсии значительно выше из-за отсутствия буферного уровня. Это видно на примере расчёта в статье [38], где показано, что увеличение доли кластеризованных ионов с 0,2 % до 4,1 % приводит к уменьшению эффективности в два раза. С другой стороны, расчёты из [18] показывают, что для падения эффективности в два раза при накачке на 976 нм необходимо увеличить долю кластеризованных ионов с 5 % до 25 % в ФтАС матрице с малым содержанием алюминия. Таким образом, схемы с накачкой на длине волны 1535±5 нм оказываются существенно более чувствительными к кластеризации ионов эрбия. Максимальная продемонстрированная эффективность составляет 80 % при средней мощности 18 Вт и накачке по сердцевине [38]. Этот результат получен в ЭИВС, где иттербий использован только для уменьшения кластеризации, так как передача энергии от эрбия к иттербию возможна только в результате апконверсии.

Диодные модули накачки на 1535±5 нм слабо развиты – максимальная мощность таких коммерчески доступных диодов на порядок меньше мощности диодов с длиной волны излучения 915/976 нм. Так же они имеют в 2-2,5 раза меньшее КПД (коэффициент преобразования электрической мощности в оптическую). По этой причине в [38] накачка производилась при помощи ЭИВЛ. Эффективность от диодов накачки, использовавшихся в ЭИВЛ, составляет 32 %.

Максимальная мощность при накачке на длине волны 1535±5 нм составляет 264 Вт при эффективности 74 % и получена в ЭИВС [39]. При этом накачка осуществлялась при помощи 36 ЭИВЛ, которые имели эффективность 35,6 % относительно введенной мощности многомодовой накачки. Эффективность от мощности диодов накачки составила 26,3 %. При накачке диодами на 1535±5 нм было получено 88 Вт с эффективностью 60 % в ЭВС [40].

Все вышеперечисленные результаты с накачкой по оболочке были получены при длине ВС более 10 метров: 18 м в [39] и 15 м в [40]. Учитывая повышенную чувствительность к кластеризации, можно сделать вывод, что накачка по оболочке на длине волны 1535 нм не подходит для создания ВУ с большой пиковой мощностью. В [38] требуется большая входная мощность для получения высокой эффективности, что так же делает такую схему непригодной для создания ВУ с большой пиковой мощностью.

1.4.5. Накачка эрбиевых волоконных усилителей по сердцевине на 980 нм

Накачка ЭВС по сердцевине на 980 нм широко применяется для ЭВС с малым размером сердцевины. Максимальная мощность одномодовых диодов на данной длине волны, которые могут быть использованы для накачки по сердцевине, составляет ~ 1 Вт. В последние годы были разработаны источники одномодового излучения на длине волны 976 нм с большой средней мощностью [41,42]. Максимальная мощность и эффективность таких источников составили 13 Вт и 31 % соответственно в [42]. Таким образом, максимальная возможная эффективность ЭВУ от диодов накачки при 100 % квантовой эффективности составит 19,6 %. В силу значительно меньшей оптимальной длины при накачке по сердцевине, можно предположить, что использование такой накачки позволит получить ВУ с большой пиковой мощностью и сравнимой с [19] эффективностью. Более того, использование фотонно-кристаллического ВС позволило получить эффективность 63 % при мощности 94 Вт [43]. Этот ВС имел сердцевину размером 80 мкм, и параметр качества выходного пучка M² после усиления в нём составлял 2,2. Таким образом, мощная накачка по сердцевине на 976 нм является перспективной для создания ВУ с большой пиковой мощностью и эффективностью. В то же время на момент написания диссертации работ по данной теме не выполнялось и не было найдено в литературе, что вероятнее всего объясняется сложностью конструкций ВЛ генерирующих мощное излучение в области 976 нм, а также необходимость создания надежных одномодовых объединителей мощной накачки и усиливаемого сигнала.

1.4.6. Вывод

Основные результаты в области ВУ для усиления спектрально ограниченных наносекундных импульсов в спектральной области около 1,55 мкм до большой пиковой мощности представлены на рисунке 6. Как уже упоминалось выше, достижение высокой пиковой мощности и эффективности

– две противоположные задачи. На рисунке 6 видно, что во всех приведённых работах высокая пиковая мощность достигается за счёт уменьшения эффективности, а высокая эффективность была получена только в источниках непрерывного излучения.



Рисунок 6. Дифференциальная эффективность преобразования излучения диодов накачки в сигнальное излучение от максимальной пиковой мощности для импульсных источников или максимальной продемонстрированной средней мощности для источников непрерывного излучения для разных схем накачки. Сплошные символы соответствуют схемам с попутной накачкой, открытые – со встречной. 1 – ЭИВС с накачкой по оболочке на 915-976 нм [20], [25], [26], [29], [44–51]; 2 – ЭВС [39]с накачкой по оболочке на 976-980 нм [16], [31], [33]; 3 – ЭВС с накачкой по сердцевине на 1480 нм [35–37]; 4 – ЭВС и ЭИВС с накачкой на 1535 нм [38–40], [52].

1.5. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна в волоконных световодах

ВРМБ – нелинейный процесс, с наименьшим порогом для ВЛ и ВУ с излучением, имеющим меньшую либо близкую ширину с шириной спектра ВРМБ в ВС (~20-50 МГц в зависимости от длины волны). Он проявляется в генерации сдвинутого вниз по частоте излучения, распространяющегося в обратном сигналу направлении. В ВЛ и ВУ ВРМБ ограничивает максимальную пиковую мощность или среднюю мощность для излучения с малой спектральной шириной, а при превышении порога может приводить к повреждению компонент ВЛ или ВУ или разрушению активного ВС.

Классически процесс ВРМБ может быть описан как нелинейное взаимодействие между двумя световыми волнами: волной излучения накачки и волной стоксового излучения, через акустическую волну. Акустическая волна, возбуждаемая за счёт эффекта электрострикции [53], модулирует показатель преломления среды, образуя движущуюся со скоростью V_A брэгтовскую решётку. Излучение накачки, рассеянное на этой решётке, сдвигается вниз по частоте за счёт эффекта Доплера. С квантово-механической точки зрения этот процесс может быть описан как одновременное уничтожение фотона накачки с рождением фотона на Стоксовой частоте и акустического фонона. Законы сохранения импульса энергии для данного процесса представлены ниже:

$$\Omega_B = \omega_{
m H} - \omega_{
m C}, \qquad \overrightarrow{k_{
m A}} = \overrightarrow{k_{
m H}} - \overrightarrow{k_{
m C}},$$

где $\omega_{\rm H}$ и $\omega_{\rm C}$ – частоты, $\vec{k}_{\rm H}$ и $\vec{k}_{\rm C}$ – волновые векторы волн накачки и Стокса, Ω_B и $\vec{k}_{\rm A}$ – частота и волновой вектор акустической волны. Для акустической волны справедливо:
$$\Omega_B = V_A \left| \overrightarrow{k_a} \right| \approx 2V_A \left| \overrightarrow{k_H} \right| \sin \frac{\theta}{2}, \tag{1}$$

где θ – угол между волновыми векторами накачки и Стокса и принято приближение $|\vec{k}_{\rm H}| \approx |\vec{k}_{\rm C}|$. Из (1) видно, что Ω_B – равная сдвигу частоты между волной накачки и Стоксовой волной зависит от угла рассеяния, максимальна в обратном направлении и стремится к 0 в прямом. Так как в одномодовом ВС только эти два направления являются световедущими, ВРМБ в подавляющем большинстве случаев только в обратном направлении. Получаем из (1):

$$\Omega_B = \frac{4\pi n V_A}{\lambda_{\rm H}},\tag{2}$$

где *n* – показатель преломления стекла сердцевины BC, $\lambda_{\rm H}$ – длина волны накачки.

Стоксова волна в процессе ВРМБ характеризуется спектральной зависимостью $g_B(\Omega)$ с пиком при $\Omega = \Omega_B$. Ширина спектра ВРМБ определяется затуханием акустической волны или временем жизни фононов. Если принять, что акустическая волна затухает по закону $e^{-\Gamma_B t}$ с коэффициентом затухания Γ_B , спектр ВРМБ имеет лоренцеву форму [53]:

$$g_B(\Omega) = g_{\pi} \frac{(\Gamma_B/2)^2}{(\Omega - \Omega_B)^2 + (\Gamma_B/2)^2},$$
 (3)

где величина пика при $\Omega = \Omega_B$ [54]:

$$g_{\pi} \equiv g_B(\Omega_B) = \frac{2\pi^2 n^7 p_{12}^2}{c\lambda_{\rm H}^2 \rho_0 V_A \Gamma_B},\tag{4}$$

где p_{12} -коэффициент фотоэластичности, n – показатель преломления, ρ_0 – плотность среды. Ширина на полувысоте определяется как $\Delta \Omega_B = \frac{\Gamma_B}{2\pi}$, а время жизни фононов $\tau_B = \Gamma_B^{-1} \sim 10$ нс. Из (4) следует, что величина пика ВРМБ обратно пропорциональна $\lambda_{\rm H}^2$. Однако, $\Delta \Omega_B$ и, как следствие Γ_B , то же обратно пропорциональны $\lambda_{\rm H}^2$. Поэтому величина пика не зависит от длины волны излучения.

Формула (3) справедлива для непрерывного или квази-непрерывного излучения накачки (ширина импульса $\tau_{\rm H} \gg \tau_B$) с шириной спектра $\Delta \Omega_{\rm H} \ll \Delta \Omega_B$. В случае коротких импульсов или излучения с большой спектральной шириной усиление ВРМБ оказывается значительно ниже, чем рассчитанное по формуле (4). В случае излучения с большой шириной спектра усиление ВРМБ вычисляется по формуле (4) но уменьшается в 1 + $\Delta \Omega_{\rm H} / \Delta \Omega_B$ раз [55].

Так как ВРМБ – вынужденный процесс он так же является и пороговым. Для оценки порога ВРМБ используется следующее равенство [56]:

$$g_{\Pi} I_{\Pi op} L_{\vartheta \phi} \approx 21$$

$$P_{\Pi op} = 21 \frac{A_{\vartheta \phi}}{g_B L_{\vartheta \phi}},$$
(5)

где $g_B \equiv g_{\Pi}$ – пиковое значение усиления ВРМБ и $P_{\Pi op} = I_{\Pi op} A_{\Im \varphi}$.

Формула (5) получена для линейно поляризованной накачки и Стоксовой волны в ВС с сохранением поляризации. В случае ВС, не сохраняющих поляризацию, флуктуации плотности, микроскопические дефекты и деформация ВС приводят к случайному изменению поляризация распространяющегося излучения по длине ВС. В [57] показано, что при рассмотрении двух световых волн с частотами, отличающимися на частоту сдвига ВРМБ, распространяющихся навстречу друг другу по ВС не сохраняющему поляризацию эффективность усиления за счёт ВРМБ зависит от взаимной поляризации в точке ввода одной из волн. Она равняется $\eta_{\parallel}=2/3$ при совпадающей поляризации и $\eta_{\perp} = 1/3$ при взаимоперпендикулярной рассмотрении сохраняющих поляризации. При поляризацию BC эффективности усиления ВРМБ равняются $\eta_{\parallel} = 1$ и $\eta_{\perp} = 0$. Таким образом,

эффективность ВРМБ в присутствии заданной стоксовой волны зависит от поляризации накачной волны. Измеренный таким способом коэффициент усиления ВРМБ будет равен $\eta_{\Rightarrow}g_6$, где $\eta_{\Rightarrow} = \eta_{\perp} \dots \eta_{\parallel}$. И для получения полного g_6 в любом ВС:

$$g_6 = \eta_{\parallel} g_6 + \eta_{\perp} g_6, \tag{6}$$

Таким образом, для учёта поляризационных особенностей ВРМБ в различных ВС формулу (5) необходимо ввести поляризационный коэффициент *К*:

$$P_{\rm nop} = 21 \frac{KA_{\rm sop}}{g_B L_{\rm sop}}.$$
 (7)

Для BC с сохранением поляризации K = 1 для излучения линейно поляризованного вдоль одной из осей BC и K = 2 при линейной поляризации под углом 45° к оси волокна (круговой поляризации). Для BC, не сохраняющих поляризацию, $K \ge 1$ для линейной поляризации накачки и $K \le 3/2$ для круговой поляризации накачки.

1.6. Способы повышения порога вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в волоконных световодах путём создания градиента резонансной частоты по длине

Из формул (2) и (4) видно, что частота и высота резонансного пика ВРМБ зависят от материальных параметров ВС. К ним непосредственно относятся показатель преломления, скорость звука, время жизни фононов, коэффициент фотоэластичности и плотность вещества сердцевины. Все они напрямую зависят от состава стекла сердцевины, а также опосредованно от температуры и напряжения сердцевины ВС. Таким образом, изменение одного или нескольких из этих параметров приводит к изменению резонансной частоты и величины пика ВРМБ. Изменение резонансной частоты в силу малости ширины линии оказывается наиболее практически значимым. По этой причине один из способов повышения порога ВРМБ основан на вариации одного или нескольких вышеперечисленных параметров по длине ВС. При этом излучение, возникающее за счёт спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в одной части ВС, может усиливаться за счёт ВРМБ только в той части ВС, в которой оно имеет перекрытие с локальным спектром ВРМБ. Далее приведено рассмотрение различных методов создания градиента резонансной частоты ВРМБ по длине ВС.

1.6.1. Градиент концентрации легирующей добавки

Один из способов изменения частоты ВРМБ – изменение состава сердцевины ВС. Самый простой способ для изменения состава сердцевины ВС – использование нескольких ВС с разным составом сердцевины вместо одного. При этом для той же суммарной длины порог ВРМБ при условии достаточного изменения резонансной частоты между всеми ВС оказывается увеличен во столько раз, сколько разных ВС было использовано. Например, в [58] было использовано 3 BC с разным содержанием GeO₂, что привело к повышению порога в 3,7 раз (5,7 дБ). Более высокое повышение порога связано с зависимостью величины пика ВРМБ от состава сердцевины и выбором ВС с наибольшим пиком для сравнения. Этот метод, с одной стороны, ограничен в применении для больших длин ВС, использующихся, например, В волоконно-оптических линиях связи из-за уменьшения надёжности линии связи с увеличением количества сварок между ВС. Так же дополнительные сварки приводят к росту потерь. С другой стороны, для коротких ВС, таких как пассивные ВС на выходе из мощных усилителей его применимость ограничена отсутствием альтернатив стандартным ВС с большим полем моды и практическими соображениями сварки большого количества ВС малой длины.

В [59-61] изменялась концентрация легирующих добавок в процессе изготовления заготовки ВС. В [59] заготовка ВС с германосиликатной

40

одномодовой сердцевиной подвергалась переменному по длине легированию фтором, при этом разница показателей преломления между сердцевиной и оболочкой оставалась неизменной. В [60] изменялась концентрация P₂O₅ по заготовки, что приводило к изменению разницы показателей длине преломления сердцевины и оболочки. В [61] из стандартной заготовки BC высверливался германосиликатного цилиндр, перпендикулярно проходящий через сердцевину. На полученную стержень была одета фторированная оболочка. Таким образом стержень становился волноведущим по всей длине (даже в области без GeO₂). Градиент концентрации GeO₂ обеспечивался за счёт неравномерного легирования оригинальной заготовки. Первые две реализации этого метода привели к сравнимым результатам повышения порога на 6 дБ в [60] и 7 дБ в [59]. Третья реализация [61] показала меньший результат повышения порога на 4,4 дБ. Однако её преимуществом оказался большой градиент легирующей добавки, что привело к на порядок меньшей длине ВС, для которой наблюдалось повышение порога. Эти методы применимы только для больших длин ВС: сотни метров для методов [59] и [60] и десятки метров для [61]. Они ограничены максимальной концентрацией легирующих добавок, которая позволит сохранить одномодовость в ВС.

1.6.2. Градиент температуры

Как упоминалось выше, частота сдвига ВРМБ зависит от температуры. В [62] продемонстрированно создание градиента температуры для 100 метров ВС, намотанного на 8, стабилизированных по температуре, алюминиевых катушек. Таким образом создавался градиент температуры с амплитудой 140 °С. При измеренном сдвиге частоты пика ВРМБ 1,2 МГц/°С это привело к увеличению порога ВРМБ на 4,8 дБ. Максимальная температура и, следовательно, разброс температур в данном случае ограниченны температурной стойкостью покрытия ВС. Это ограничивает максимальное повышение порога достижимое с применением данного метода. Градиент температуры возникает в активных ВС за счёт квантового дефекта при достаточной мощности накачки [63]. В [64] в иттербиевый ВУ было введено 700 Вт накачки, что, при достаточно малом поглощении накачки из оболочки 2 дБ/м, привело к разности температуры между концами ВС 190 °C. В таких условиях повышение порога составило 7 дБ. Стоит отметить, что данный эффект в разной степени возникает во всех ВУ с большой мощностью накачки.

1.6.3. Градиент деформации

Деформация – один из параметров, влияющих на частоту пика ВРМБ. Создание градиента натяжения по длине ВС – инженерная задача с множеством способов решения. В [65] был предложен способ повышения порога ВРМБ в длинных кабелях. Это достигалось за счёт спиральной намотки ВС внутри кабеля. ВС претерпевает периодическое растяжение и сжатие на одинаковую величину – 0,35 %, что приводит к увеличению порога ВРМБ на 7 дБ. В [66] градиент натяжения создаётся за счёт использования 40 пар зажимов с переменным расстоянием между ними. Максимальное увеличение порога на 8 дБ было достигнуто при линейном увеличении натяжения по длине BC до максимального растяжения 0,72 %. В [67] BC растягивается при сжатии с боков металлического цилиндра на который он намотан. Максимальное продемонстрированное растяжение составляет 1%, a повышение порога – 8,4 дБ. Сжатие ВС производится путём закрепления ВС на тонкой длинной металлической пластине, скрученной в форме пружины, и прикладывания угловой деформации в направлении обратном направлении намотки пружины. При этом контроль градиента оказывается затруднителен и, несмотря на достигнутый сдвиг ВРМБ – 350 МГц, что соответствует сжатию 0,5 %, повышение порога составило 4,8 дБ. Наибольшая деформация была достигнута в [68] путём намотки ВС с переменным натяжением на латунный цилиндр. Максимальное растяжение составило 3,1%, что привело к повышению порога на 15,3 дБ. При этом частота сдвига ВРМБ изменилась на 1,7 ГГц.

В итоге, деформация позволяет изменить частоту сдвига ВРМБ в большем диапазоне значений, чем температура и легирующая добавка. Однако описанные методы либо применимы только для больших длин ВС [65,66,68], либо являются сложными для практического применения [66,67].

1.7. Способы повышения порога вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна за счёт модификации акустического профиля волоконного световода

Приведённый выше теоретический анализ ВРМБ предполагал наличие только одного резонанса ВРМБ в ВС. На практике акустическая волна, возникающая в результате электрострикции в сердцевине ВС, имеет довольно малое затухание (при времени жизни 10 нс длина пробега фонона ~ 50 мкм) [69]. Это приводит к тому, что такая волна испытывает отражение от границ сердцевины из-за разности скорости звука в сердцевине и оболочке ВС. Так как в стандартных ВС, сердцевина которых легирована GeO₂, скорость звука оказывается меньше, чем в чистом кварцевом стекле, для такой волны создаются волноводные условия. Таким образом, в сердцевине ВС возникают акустические моды. Удобным оказывается введение понятия акустического показателя преломления:

$$n_{\rm A} = \frac{V_{SiO_2}}{V},\tag{8}$$

где V_{SiO_2} – скорость звука в кварцевой оболочке, а V – локальная скорость звука. Величина акустического контраста Δn_A – разница n_A сердцевины и оболочки, определяет количество акустических мод в сердцевине ВС. В представленных далее работах говорится об увеличении порога ВРМБ по сравнению с ВС со схожими волноводными оптическими свойствами.

Размер сердцевины ВС влияет на резонансные частоты акустических мод. Так в [70] было продемонстрированно повышение порога ВРМБ для ВС с изменяющимся от 0,5 до 4 мкм радиусом сердцевины. В результате такого изменения частота пика ВРМБ сместилась на 49 МГц от начала к концу ВС, что привело к увеличению порога ВРМБ на 3,6 дБ. Интересно отметить, что величина сдвига ВРМБ обратно пропорциональна радиусу сердцевины и перестаёт заметно изменятся при радиусе больше 4 мкм для длины волны излучения 1,55 мкм.

В таблице 1 приведено влияние легирующих добавок, применяющихся для создания ВС, на оптический и акустический показатели преломления в кварцевом стекле взятые из [71]. Не все легирующие добавки приводят к уменьшению скорости звука. Для случаев, когда скорость звука в сердцевине выше скорости звука в кварцевом стекле Δn_A оказывается отрицательным и такая сердцевина является антиволноводной для звуковых волн (см. рис. 76). Таким образом, в такой сердцевины преобладают вытекающие акустические моды. Спектр ВРМБ для совокупности таких мод является уширенным и несимметричным [72]. Это приводит к большему порогу ВРМБ для ВС со звуковым антиволноводным ППП сердцевины. Такое уширение впервые было продемонстрированно в [73] для ВС с GeO₂ сердцевиной и оболочкой легированной GeO₂ и B₂O₃, где антиволноводный профиль создавался за счёт увеличения акустического показателя преломления оболочки.

Как видно из таблицы 1, Al_2O_3 понижает акустический показатель преломления. Поэтому, самый простой способ для создания акустического антиволноводного профиля – легирование сердцевины BC Al_2O_3 . В [74] сердцевины BC была легирована 27 вес.% Al_2O_3 ($\Delta n_A = -0,114$), что привело к повышению порога ВРМБ на 6,1 дБ по сравнению с BC с высокой концентрацией GeO₂ и таким же полем моды. В [75] концентрация Al_2O_3 была ниже – 11 вес.% ($\Delta n_A = -0,0465$). Повышение порога ВРМБ так же оказалось ниже – 4,7 дБ. Таким образом выявляется первая закономерность - концентрация Al₂O₃ пропорциональна повышению порога.

Таблица 1. Влияние легирующей добавки на оптический и акустический показатели преломления в кварцевом стекле [71]. Δn_A рассчитан по формуле (8). В качестве V взято значение V_L=1,01V_{lsscw} из [71].

Добавка	$\Delta n*10^{-3}/Bec.\%$	$\Delta n_{\rm A} * 10^{-2} / \text{Bec.}\%$
GeO ₂	0,81	0,48
P ₂ O ₅	0,29	0,31
F	-4,48	3,77
TiO ₂	3,32	0,60
Al ₂ O ₃	0,91	-0,42
B ₂ O ₃	-0,48	1,26



Рисунок 7. Схемы способов повышения порога ВРМБ за счёт изменения акустического профиля. а) Стандартный ВС; б) ВС с сердцевиной легированной Al₂O₃ – антиволноводный акустический профиль; в) ВС с акустическим кольцом вокруг сердцевины; г) ВС с треугольным акустическим профилем и пьедесталом.

В [76] акустический антиволноводный профиль создавался за счёт легирования оболочки 1,3 вес.% фтора при чисто кварцевой сердцевине. Таким образом разница акустических показателей преломления между сердцевиной и оболочкой составила -0,049, что примерно совпадает с величиной в [75]. Однако в данной работе повышения порога не наблюдалось. Соответственно, антиволноводный акустический профиль не является достаточным условием для повышения порога ВРМБ. Повышение порога в случае легирования Al_2O_3 может быть вызвано понижением времени жизни фононов Γ_B и увеличением количества неоднородностей, которые изменяют локальный сдвиг ВРМБ. В пользу первого выступает большая ширина линии ~ 100 МГц в спектре алюмосиликатных ВС [77]. В пользу последнего выступает слабое уширение линии в спектре ВРМБ в [76] для ВС, сердцевина которого была легирована 1 вес.% фтора, а оболочка – 2 вес.% фтора ($\Delta n_A = -0,0377$) за счёт неоднородностей внесённых фтором в стекло сердцевины.

В [78] впервые была предложена идея создания акустического волноводного слоя конечного размера вокруг сердцевины ВС для уменьшения перекрытия оптической и акустических мод (см. рис. 7в). В ВС с акустическим кольцом толщиной 9,2 мкм и $\Delta n_{A \text{ сердцевина/кольцо}} = -0,018$ повышение порога составило 2,1 дБ, а в ВС с кольцом толщиной 3,4 мкм и $\Delta n_{A \text{ сердцевина/кольцо}} = -0,065 - 1,3$ дБ. Таким образом, в данной конфигурации – при равномерном легировании сердцевины – повышение порога пропорционально ширине звукового волноведущего слоя (кольца).

В [79] структура с звуковым волноведущим слоем была доработана внесением градиента Δn_A от центра к краю сердцевины (см. рис. 7г). В [80] приведены данные по концентрациям легирующих добавок и профилю скорости звука в [79]. Сердцевина была легирована Al₂O₃ с линейно уменьшающейся концентрацией и GeO₂ с линейно возрастающей концентрацией от центра к краю сердцевины. Δn_{A сердцевина/пьедестал} изменялся от -0,04 до 0,01 от центра к краю сердцевины (полный размах 0,05). Вокруг 46 сердцевины создан германиевый слой - пьедестал толщиной 200 мкм, необходимый для уменьшения числовой апертуры сердцевины. Отдельного акустического волноведущего слоя вокруг сердцевины создано не было, однако, область с краю сердцевины имела больший n_A, чем пьедестал, и в ней происходила локализация акустических мод. Было достигнуто повышение порога на 7,1 дБ. В [81] почти в 2 раза увеличен размах n_A до 0,09, что позволило повысить порог ВРМБ на рекордную на момент написания диссертационной работы величину 11,2 дБ. Важно отметить, что ВС в [79] и [81] являлись активными – их сердцевина была легирована иттербием. Именно это позволило создать такой большой размах n_A за счёт создания сильно легированного пьедестала. В пассивных ВС нет эффекта выборочного усиления фундаментальной моды, что в случае ВС с большим пьедесталом приведёт к возбуждению оптических мод пьедестала и перекачки в них доли

В [82] порог ВРМБ увеличивается за счёт создания в сердцевине ВС областей с разным составом. Достигается это за счёт компоновки заготовки сердцевины ВС из шестигранных стержней 3 разных составов. Это привело к появлению трёх пиков в спектре ВРМБ ВС, вытянутого из такой заготовки. Однако, высоты этих пиков не были выровнены – преобладал пик, соответствующий центральной шестиугольной области сердцевины. По этой причине повышение порога составило всего 3 дБ вместо возможных 4,7 дБ при равных высотах пиков. Сложность контроля относительных высот пиков ВРМБ в такой сердцевине – основной недостаток такого метода.

1.8. Выводы

К моменту начала работы над данной диссертацией проблема создания ВУ для спектрально ограниченных наносекундных импульсов в спектральной области около 1,55 мкм с большой пиковой мощностью и высокой эффективностью не была решена. Для ВУ с пиковой мощностью больше 1 кВт максимальная эффективность составила 7% [26]. Не было разработано метода для повышения порога ВРМБ в пассивных одномодовых ВС с большим полем моды короткой длины – ВС, используемых для доставки излучения с узкой спектральной шириной и большой пиковой мощностью. Методы, демонстрирующие большое повышение порога применимы либо только для больших длин ВС, либо только для активных ВС, либо для неодномодовых ВС с большой числовой апертурой.

Глава 2. Эрбиевые волоконные усилители с накачкой по оболочке

Данная глава посвящена изучению методов повышения эффективности и пиковой мощности в ЭВС, не содержащих иттербий и накачиваемых по оболочке. Один из способов повышения эффективности для ЭВС с высокой пиковой мощностью – разработка матрицы стекла ВС с большей растворимостью эрбия. Этому посвящён первый параграф данной главы. Скорость поглощения накачки в ЭВС, а, следовательно, и оптимальная длина ЭВУ, зависят от соотношения диаметров сердцевины и оболочки в ЭВС. Этот эффект исследуется во втором параграфе данной главы для случая многомодового ЭВС. В третьем параграфе описывается исследованный способ повышения площади сердцевины ВС с сохранением одномодового режима распространения излучения сигнала при помощи использования конусной геометрии ВС.

2.1. Эрбиевый волоконный усилитель с фтор-германийалюмосиликатной матрицей

В главе Глава 1 показано, что эффективность ЭВС зависит от состава стекла сердцевины. Матрица стекла сердцевины оказывает наибольшее влияние на эффективность в ВС с большой концентрацией эрбия. Рекордные результаты пиковой мощности для спектрально ограниченных наносекундных импульсов были продемонстрированы с использованием АФС матрицы [19]. В то же время наибольшая эффективность была продемонстрирована с

использованием ФтАС матрицы [16]. Однако, применимость ФтАС матрицы для ВУ с большой пиковой мощностью ограничивается максимальной концентрацией алюминия для соблюдения одномодового режима распространения излучения, которая составляет 1,5 мол.% в [16] для сердцевины диаметром 34 мкм.

Для решения проблемы низкой концентрации оксида алюминия с сердцевине ВС с небольшой апертурой в Институте химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН (ИХВВ РАН) была разработана технология производства заготовок с АС матрицей, сильно легированной фтором [83], которая позволила увеличить концентрация алюминия в два раза по сравнению с [16] при сохранении низкой числовой апертуры сердцевины. Можно ожидать, что прогресс в изготовлении сложных химических составов сердцевины ВС позволит увеличить концентрацию эрбия без существенной потери эффективности.

Методом MCVD была создана серия заготовок с AC сердцевиной (до 3 мол.% Al₂O₃) высоколегированной F (до 1,5 вес.%) и разной концентрацией эрбия. Типичное распределение добавок приведено на рис. 8. Дополнительная малая концентрация GeO₂ была внесена в сердцевину для уменьшения серых потерь. Числовая апертура сердцевины в этих заготовках составила ~0,055. Внешняя поверхность заготовок была сполирована получения для поперечного сечения квадратной формы, затем из полученных заготовок были вытянуты ВС со стороной квадрата 110 мкм (площадь сечения такого ВС соответствует ВС с круглым сечением и внешним диаметром 125 мкм). В процессе вытяжки на ВС было нанесено отражающее (с низким показателем преломления) полимерное покрытие, обеспечивающее числовую апертуру оболочки > 0,45 для накачки.



Рисунок 8. Распределение добавок в одном из ФГАС, измеренное сканирующим электронным микроскопом JEOL JSM-5910LV с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. а)Al2O3 и GeO2 (мол.%); б) Ег и F (вес.%)

Для начала было произведено сравнение спектров поглощения $\Phi\Gamma AC$ и А ΦC эрбиевых BC. Спектры поглощения в двух таких BC были нормированы для получения поглощения 100 дБ/м в пике вблизи 1530 нм, что соответствует равной концентрации эрбия ~1,4*10⁻³ мол.% [84]. Пик поглощения в $\Phi\Gamma AC$ BC оказался сдвинут на 1528 нм, в то время как в А ΦC BC он располагается на 1535 нм (рис. 9а). Важно отметить, что пик поглощения в области 0,98 мкм выше в $\Phi\Gamma AC$ BC в 1,3 раза чем в А ΦC BC (рис. 9а). Так же, пик поглощения в $\Phi\Gamma AC$ BC расположен на 976 нм по сравнению с 981 нм для А ΦC BC. Учитывая то, что стандартная длина волны стабилизации для коммерческидоступных мощных многомодовых лазерных диодов составляет 976 нм, на первый взгляд представляется, что ФГАС ВС предпочтительнее для использования в ВЛ и ВУ. Повышенное поглощение на 976 нм с повышенной растворимостью эрбия [12,84] должны приводить к повышению эффективности ФГАС ВУ с накачкой по оболочке по сравнению с АФС ВУ при одинаковой геометрии ВС.

Для проверки этого предположения в качестве опорных ВС был использован АФС аналогичный использованному в [18]. Для чистоты сравнения АФС ВС имел идентичную ФГАС ВС геометрию. Пик поглощения из оболочки на 981 нм в АФС составляет 2,9 дБ/м. Было использовано два образца ФГАС ВС с разной концентрацией эрбия. ФГАС ВС №1 имел такое же поглощение в пике на 976 нм, как и АФС ВС (2,9 дБ/м), ФГАС ВС №2 имел более высокое поглощение – 3,7 дБ/м.



Рисунок 9. Поглощение слабого сигнала сердцевиной эрбиевых ВС в области а) 0,98 мкм и б) 1,53 мкм



Рисунок 10. Схема ВУ для измерения эффективности. ДЗ – дихроичное зеркало. УВОМ – устройство для вывода оболочечных мод

Все ВС были протестированы в схеме ВУ с попутным направлением распространения сигнала и накачки (рис. 10). В качестве задающего сигнала были использованы ВЛ на длине волны 1557 нм и 1590 нм со средней мощностью 0,5 Вт. Накачка от многомодовых диодов со стабилизацией по длине волны на 976 нм (981 нм для АФС) мощностью до 45 Вт объединялась с сигнальным излучением при помощи коммерчески доступного объединителя сигнала и накачки 2+1 -> 1 на основе BC с внешним диаметром 125 мкм и диаметром сердцевины 20 мкм. Конец тестируемого ВС был сколот под углом для устранения обратной связи, возникающей за счёт френелевского отражения, которая приводит к усилению сигнала в обратном направлении и эффективность ВУ. Непоглощённая накачка на уменьшению конце тестируемого ВС выводилась устройством для вывода оболочечных мод аналогичным использованному в [85]. Для устранения непоглощённого излучения накачки, распространяющегося по сердцевине, использовалось дихроичное зеркало, пропускающее излучения в области 0,98 мкм и отражающее излучение в области 1,5-1,6 мкм.



Рисунок 11. Эффективность по длине тестируемых ВС для сигнала с длиной волны а) 1557 нм и б) 1590 нм.

Было установлено, что одинаковое поглощение в АФС и ФГАС ФС №1 приводит к равной оптимальной длине. Максимальная эффективность ФГАС №1 в более чем 1,2 раза превышает максимальную эффективность в АФС при накачке на 976 нм (см. табл. 2). Использование накачки на длине волны 981 нм повышает эффективность АФС в 1,5 раза при длине волны сигнала 1557 нм, что превосходит эффективность ФГАС №1. Таким образом, если накачка стабилизирована на длине волны 976 нм, то предпочтительнее оказывается ΦΓΑC BC. использование Если возможно использовать накачку. стабилизированную на длине волны 981 нм, то АФС ВС показывают существенно лучшую эффективность, чем ФГАС ВС.

Для сигнала 1590 нм предпочтительным оказывается ФГАС матрица. Так при использовании накачки, стабилизированной на длине волны 976 нм использование ФГАС матрицы либо позволяет сократить длину ВС при неизменной эффективности (сравни ФГАС ВС №2 и АФС ВС), либо заметно повысить эффективность преобразования накачки в сигнал (сравни ФГАС ВС №1 и АФС ВС). Более того, в последнем случае даже использование накачки, стабилизированной на длине волны 981 нм не позволяет АФС ВС достичь эффективности, ФГАС ВС №1.

BC №	Поглощение из оболочки, дБ/м		Оптимальная длина, м		Максимальная эффективность, %	
	976 нм	981 нм	1557 нм	1590 нм	1557 нм	1590 нм
ФГАС №1	2,9	2,1	3,2	5,9	15,8	28
ΦΓΑС №2	3,7	2,7	1,8	4,1	10,5	22,2
ΦΓΑС №3	3,2	2,3	2,6	4,6	13	21,5
АФС (976 нм)	2,1	2,9	3,2	6,8	12,6	22,9
АФС (981 нм)			3,2	5,3	18,8	25,7

Таблица 2. Сравнение эрбиевых ВС с разными матрицами при усилении сигнала на 1557 нм и 1590 нм.

В результате преимущество одной матрицы над другой зависит от параметров ВУ. ФГАС имеют большую эффективность в L диапазоне телекоммуникационного спектра (1590 нм) и/или при накачке на 976 нм. АФС BC демонстрируют большую эффективность В С диапазоне телекоммуникационного спектра при использовании накачки, стабилизированной на длине волны 981 нм. В итоге, обе матрицы имеют свои преимущества и недостатки. Более того, эффективность этих матриц в разных режимах работы варьируется не более чем на четверть, что позволяет считать их взаимозаменяемыми.

Стоит отметить, что ранее накачка на длине волны 981 нм для АФС ВС не применялась. В рамках данной диссертационной работы это позволило улучшить параметры ВУ (сократить длину при фиксированной эффективности). В частности нами был реализован ВЛ, генерирующий импульсы с длительностью 2 нс и с пиковой мощностью 84 кВт и эффективностью 10%, который был в дальнейшем использован А.В. Гладышевым и др. как источник накачки для преобразователя частоты, основанного на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния на водороде и дейтерии в полом ВС [86], что в свою очередь позволило А.В. Гладышеву и др. получить мощное излучение на длине волны 3,5 мкм, которая лежит за окном прозрачности кварцевого стекла.

Применительно диссертации проведенное исследование К теме двух различных составов интересно тем, ЧТО наличие сердцевины, обеспечивающих близкую эффективность, позволяет значительно повысить пиковую мощность узкополосных ВУ (ширина линии <100 МГц), где ключевым препятствием является ВРМБ. Основной способ повышения пиковой мощности в таких ВУ – уменьшение длины ВС, что приводит к росту порога ВРМБ. Однако, это вызывает уменьшение эффективности ВУ. Уникальная особенность ВРМБ в ВС – узкая ширина пика усиления, положение которого зависит от состава сердцевины ВС. Таким образом, последовательное соединение двух коротких отрезков ВС с разным составом сердцевины в одном ВУ позволит оставить неизменным порог ВРМБ по сравнению с одиночным коротким отрезком ВС (при условии, что спектры ВРМБ В этих BC не перекрываются). Положительным эффектом использования двух ВС разного состава в данном случае будет рост эффективности за счет увеличения мощности поглощенной накачки относительно ВУ на основе одиночного, короткого отрезка ВС. По сравнению с ВУ на основе длинного (с длиной, равной суммарной длине использованных отрезков ВС) одиночного ВС эффективность практически не изменится, но будет заметно повышен порог ВРМБ.

55



Рисунок 12. ППП, измеренный анализатором ППП EXFO NR9200HR (сплошные кривые) и рассчитанные распределения электрического поля моды LP01 (штрихованные линии) в АФС и ФГАС №3 ВС.

Такой подход был ранее продемонстрирован для высоконелинейных ВС (с большой концентрацией GeO₂ в сердцевине) [58,87]. Однако, до начала работы над данной темой не существовало альтернативных матриц сердцевины для эрбиевых ВС с большим полем моды, обеспечивающих высокую эффективность и низкую числовую апертуру. Лучшие результаты по усилению одночастотных импульсов до высоких пиковых мощностей были использованием AΦC матрицы [18,31]. продемонстрированы с BC, разработанные в рамках данной темы, делают возможным использование данного метода для эрбиевых ВУ с большим полем моды и накачкой по оболочке.

Для демонстрации данного подхода были использованы два ВС: АФС и ФГАС №3 (см. табл. 2). ФГАС №3 имеет среднюю концентрацию эрбия между ФГАС №1 и ФГАС №2. Он был выбран для сохранения равной эффективности в ВУ при накачке на 976 нм. Это позволяет сравнивать пороги ВРМБ в ВУ без необходимости учитывать разницу в эффективностях для разных матриц. Использованные в эксперименте ВС имели близкие ППП (см. рис.12) и, соответственно, диаметры поля моды: 27,7 мкм для АФС и 27,1 для ФГАС №3. Таким образом потери на сварку между этими ВС были пренебрежимо малы. Рассчитанная длина волны отсечки в обоих ВС составила ~2,2 мкм, что позволило добиться одномодового режима распространения излучения сигнала по сердцевине ВС при диаметре ~20 см.



Рисунок 13. Спектры ВРМБ в пассивных ВС с АФС и ФГАС матрицами стекла сердцевины аналогичными эрбиевым ВС.

Для оценки резонансных частот ВРМБ в данных ВС были произведены измерения спектра ВРМБ в пассивных ВС (без эрбия) с аналогичным составом стекла сердцевины. В силу равности малой концентрации эрбия, предполагается, что его вклад относительное расположение пиков является пренебрежимо малым. На рис.13 видно, что ВС с АФС матрицей и ФГАС матрицей имеют минимальное перекрытие спектров ВРМБ. Это позволяет использовать такие ВС для повышения порога ВРМБ в ВУ.

Схема комбинированного усилителя, состоящего из двух эрбиевых ВС приведена на рис. 14. Она аналогична изображённой на рис. 10, но в качестве активной среды ВУ используются два куска эрбиевых ВС с разным составом сердцевины, сваренных друг с другом. Источник импульсов представляет из себя ΒЛ. Он импульсы заданной подаёт формы ДЛЯ достижения импульсов длительностью 180 нс после усиления в прямоугольных тестируемом ВУ. Частота повторения импульсов составляет 20 кГц, средняя мощность – 100 мВт. Во всех экспериментах использовалась накачка на длине волны 976 нм.



Рисунок 14. Схема комбинированного усилителя, состоящего из двух типов эрбиевых ВС. ИИ – источник импульсов.

Длина усилителя была зафиксирована на величине 2,6 м. Были произведены эксперименты с АФС и ФГАС №3 ВС по-отдельности и с комбинированным усилителем. ФГАС №3 имеет большее поглощение на длине волны накачки и, следовательно, большее усиление. Поэтому, он имел меньшую длину в комбинированном усилителе и был помещён после АФС ВС для уменьшения нелинейности. Порог ВРМБ фиксировался по наблюдению импульсной нестабильности, связанной с ВРМБ (последняя точка на каждой кривой на рис. 15). Дополнительно производилось измерение доли мощности, отражённой назад из-за ВРМБ (штриховые линии на рис. 15). Из-за меньшего поглощения накачки в АФС ВС порог в нём оказался выше и составил 1,2 кВт против 1 кВт в ФГАС №3. При комбинации 1,5 метров АФС ВС и 1,1 ФГАС №3 ВС порог ВРМБ составил 1,8 кВт. Интересно отметить, что эффективность для АФС и ФГАС №3 по-отдельности составила 13%, в то время как эффективность комбинированного усилителя была равна 14,4%. Таким образом использование составного ВУ, где последовательно были сварены АФС и ФГАС ВС позволило повысить порог ВРМБ в 1,5 раза по сравнению с ВУ на основе АФС ВС без потери эффективности.



Рисунок 15. Зависимость пиковой мощности (слева, сплошные кривые) и доли мощности отражённой ВРМБ (справа, штриховые кривые) от мощности накачки.

2.2. Многомодовый эрбиевый волоконный усилитель

Как уже было упомянуто выше, увеличение соотношения диаметра сердцевины к диаметру оболочки приводит к повышению поглощения накачки в схемах ЭВУ с накачкой по оболочке. Это позволяет уменьшать концентрацию эрбия без увеличения оптимальной длины ВС, что приводит к уменьшению кластеризации и росту эффективности. Данный подход в значительной степени ограничен технологией изготовления ВС – для

достижения одномодового режима при увеличении диаметра сердцевины требуется уменьшение апертуры ВС и, соответственно все более точный контроль показателя преломления легированной сердцевины. Более того, уменьшение апертуры сердцевины делает ВС более чувствительным к изгибу, что требует отдельного подбора длины волны отсечки и диаметра намотки ВС, обеспечивающих достижение одномодового режима распространения без существенного роста серых потерь фундаментальной моды. Более того, при больших соотношениях диаметра сердцевины И оболочки высоким коэффициентом усиления начинают обладать и оболочечные моды, что делает достижение одномодового режима распространения отдельной сложной научной задачей.

В многомодовый одномодовый либо то же время режим распространения практически не влияет на эффективность преобразования накачки в сигнал, но при этом многомодовые ЭВУ востребованы в целом ряде применений. Так они могут быть использованы в качестве источников накачки в полосу поглощения эрбия на 1535 нм [38-40,88,89] и для накачки по оболочке тулиевых ВУ [90]. По этой причине в настоящей главе мы предельно достижимой эффективности остановились на изучении преобразования накачки в сигнал в многомодовых эрбиевых ВС.

При выборе размера сердцевины многомодового ВС мы учитывали, что в ряде практических применений ограничения связаны с требованием согласования параметров активного ВС с ВС, используемыми для доставки излучения накачки в коммерчески доступных объединителях сигнала и накачки. Минимальные диаметры сердцевины и оболочки таких ВС составляют 105/125 мкм при числовой апертуре сердцевины 0,15 или 0,22. Таким образом сердцевина ЭВС может быть увеличена до 105 мкм, хотя стоит отметить, что для доставки мощного излучения накачки (на уровне кВт) могут использоваться ВС с диаметром сердцевины до 400 мкм, что создает

60

определенный интерес и к созданию эрбиевых BC с большим диаметром сердцевины.

В первую очередь было проведено численное моделирование методом описанном в [16] и были рассчитаны эффективности преобразования накачки в сигнал для схемы с сонаправленным распространение сигнала и накачки (по оболочке). Расчеты проводились для ЭВС с сердцевиной 100 мкм и оболочкой 125 мкм, длина волны сигнала выбиралась равной 1535 нм и 1565 нм. Максимальные эффективности составили 42% и 48% для 1535 нм и 1565 нм соответственно, что заметно превышает эффективность, продемонстрированную ранее в одномодовых ЭВС [16].



Рисунок 16. ППП ММ ЭВС, измеренный анализатором ППП EXFO NR9200HR, и фотография торца на вставке.

Численное моделирование позволило установить оптимальную концентрацию эрбия в сердцевине ВС. После этого методом MCVD, была изготовлена заготовка с АС матрицей и концентрацией ионов эрбия равной $4*10^{24}$ м⁻³, что близко к оптимальной. Сердцевина диаметром 4 мм была сформирована послойным осаждением компонент из газовой фазы. Использовалось более 10 слоёв для сохранения равномерности ППП заготовки

(см. рис. 16). Заготовка была сполирована для придания ей восьмиугольного сечения. Из неё был вытянут ВС со средним внешним диаметром 125 мкм. Сердцевина ВС имела диаметр 95 мкм. В процессе вытяжки ВС был покрыт полимером с низким показателем преломления для создания световедущей оболочки. Числовая апертура оболочки по отношению к полимеру равна 0,46.



Рисунок 17. Схема усилителя для измерения эффективности ММ ЭВС.

Разработанный ВС был протестирован в режиме ВУ. Схема установки ВУ представлена на рис. 17. Два лазерных диода с ВС выходом и суммарной модностью до 80 Вт на длине волны 976 нм были использованы в качестве источника накачки.

ВЛ с длинами волн излучения равными 1532 нм, 1565 нм и 1590 нм и мощностями до 4 Вт были использованы в качестве входного сигнала. Излучение сигнала и накачки вводилось в ММ ЭВС через коммерчески доступный 2+1 в 1 объединитель сигнала и накачки. Длина ЭВС была подобрана для максимальной эффективности на конкретной длине волны и составила 17 м для 1565 нм и 1590 нм и 13 м для 1535 нм. Для 1535 нм и 1565 нм и 1590 нм и 13 м для 1535 нм. Для 1535 нм и 1565 нм входной мощности сигнала 0,5 Вт было достаточно для насыщения ВУ. Для 1590 нм входная мощность была увеличена до 4 Вт для получения максимальной эффективности. Кусок пассивного ВС с диаметром сердцевины 100 мкм (числовая апертура 0,15) был приварен на конце ВУ. Устройство для вывода оболочечных мод, аналогичное описанному в [85] было использовано

для фильтрации непоглощённой накачки, доля которой по численным оценкам составила ~6% для 1535 нм и ~2% для 1565 нм и 1590 нм. Выходной конец пассивного ВС был сколот под углом для предотвращения обратного френелевского отражения от торца ВС.

Зависимость выходной мощности от мощности накачки и спектры при максимальной мощности представлены на рис. 18. Для всех трёх рабочих длин выходная мощность была ограничена доступной волн максимальная эффективность мощностью Максимальная была накачки. продемонстрирована для ВУ, работающего на 1565 нм, и составила 48,7%. Если рассматривать применение созданных усилителей в качестве источника накачки для тулиевых лазеров, то необходимо иметь в виду, что ионы тулия имеют большее поглощение при больших длинах волн. Поэтому, несмотря на меньшую эффективность ВУ на 1590 нм (41,1%), он является более предпочтительным для тулиевых усилителей с точки зрения минимизации длины тулиевого ВС. Эффективность ВУ на 1535 составила 41,5%.



Рисунок 18. а) Зависимость выходной мощность ВУ на рабочих длинах волны 1535 нм, 1565 нм и 1590 нм от мощности накачки. б) Выходные спектры при максимальной выходной мощности.

Параметр качества пучка выходного излучения M² в созданных усилителях был равен ~9. Важно отметить, что для многомодовых источников накачки более важной характеристикой является распределение мощности по числовой апертуре – яркость источника накачки. Для измерения этой зависимости на пути излучения из торца ВС была помещена фиксированная апертура. Измерялась мощность в зависимости от расстояния от торца ВС до апертуры. Зная диаметр апертуры расстояние пересчитывалось в числовую апертуру по формуле:

$$NA = n \times \sin \theta = \frac{r}{\sqrt{l^2 + r^2}},$$

где NA – числовая апертура, n – показатель преломления среды (n = 1, для воздуха), r – радиус апертуры, l – расстояние до апертуры. Измеренная зависимость приведена на рис. 19. Для сравнения так же был измерен коммерчески доступный многомодовый лазерный диод компании nLight с мощностью 50 Вт и длиной волны 976 нм. Видно, что яркость разработанного ВУ превышает яркость коммерческого диода накачки с наименьшей доступной числовой апертурой 0,15 (типичная числовая апертура для мощных многомодовых диодов составляет 0,22).

Продемонстрированная 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 ВУ составила 17-24%, что совпадает с эффективностью коммерчески доступных ММ диодов для данной спектральной области. При этом у данного подхода есть 2 преимущества над ММ диодами накачки.



Рисунок 19. Зависимость доли мощности излучения ММ ЭВС на 1535 нм и диода накачки, содержащейся внутри числовой апертуры, от числовой апертуры. На вставке: изображение мод на выходе из ММ ЭВС в дальнем поле, полученное камерой Spiricon SP-1550M. Видео изменения поля моды с движением ММ ЭВС доступно по ссылке: <u>видео</u>.

Во-первых, идеальная стабилизация длины волны. Так как ВЛ, используемый в качестве источника сигнала, имеет резонатор с ВБР в качестве зеркал, ВУ имеет стабильную заданную длину волны с заданной спектральной шириной линии излучения. Обе величины контролируются параметрами решёток (типичная величина составляет 0,5 нм). Малая спектральная ширина позволяет использовать такой ВУ для эффективной резонансной накачки твердотельных лазерных систем, основанных на лазерных кристаллах. Во-вторых, возможность увеличения выходной мощности счёт за использования большего числа/ более мощных диодов накачки без ухудшения яркости. Диоды накачки с мощностью до 130 Вт в 105/125 мкм ВС на длине волны 980 нм коммерчески доступны. Использование таких диодов в совокупности с 6+1 в 1 или 7 в 1 объединителями накачки и сигнала можно ожидать достижения ~ 300 - 400 Вт выходной мощности в спектральном диапазоне 1535-1590 нм для ВС с диметром сердцевины 100 мкм. Более того, по нашим расчётам при увеличении оболочки до 200 мкм эффективность уменьшится всего до 35% для длины волны 1535 нм. При использовании такого ВС с объединителем сигнала и накачки с 19 входами для накачки (105/125 мкм с числовой апертурой 0,15) и выходным ВС с оболочкой диаметром 200 мкм и числовой апертурой 0,45 возможно достижения выходной мощности на уровне 900 Вт.

Разработанный ВЛ с длиной волны 1535 нм был применён для накачки кристалла Er:YAG, что позволило получить в 1,5 раза большую эффективность по сравнению с накачкой лазерными диодами на 1470 нм [91].

2.3. Эрбиевый волоконный усилитель на основе световода-конуса

В предыдущем параграфе исследовалось влияние увеличенного соотношения диаметра сердцевины к диаметру оболочки, что приводит к повышению эффективности ЭВУ. Однако это достигается за счёт существенного ухудшения качества пучка. В настоящем параграфе исследуется обратная задача – увеличение диаметра сердцевины с сохранением одномодового режима распространения излучения. Такие ВС крайне востребованы для создания лазеров и усилителей с предельно высокой пиковой мощностью.

Основная идея достижения качества пучка близкого к одномодовому при увеличенном диаметре сердцевины заключается в использовании

конусного BC, то есть BC с монотонно увеличивающимся в несколько раз диаметром сердцевины по длине. Фундаментальная мода, возбуждённая в тонком конце такого BC, 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 BC [92].

Заготовка для конусного BC была сделана методом MCVD. Сердцевина ВС была изготовлена на основе АФС стеклянной матрицы. Концентрация оксида эрбия в сердцевине составила 0,14 мол. %, что, при соотношении среднего диаметра первой оболочки к диаметру сердцевины равному 3-к-1, привело к величине пика поглощения слабого сигнала из оболочки на длине волны 981 нм чуть меньшему 4 дБ/м. Числовая апертура сердцевины равнялась 0.076. Дополнительно вокруг сердцевины был создан фторированный слой для уменьшения длины волны отсечки. Это позволило добиться одномодового режима распространения сигнала для слабо изогнутого тонкого конца ВС с внешним диаметром 90 мкм (длина волны отсечки ~ 1,7 мкм). Стоит отметить, что предполагаемое использование ВС с диаметром сердцевины 20 мкм и >80 мкм накладывает требования на размер неоднородностей в сердцевине. Для предотвращения перекачки энергии из фундаментальной моды в высшие в процессе распространения излучения по конусному ВС необходим гладкий и плоский ППП (см. рис. 20).

Изготовленная заготовка была сполирована до квадратной формы сечения для увеличения интеграл перекрытия оболочечных мод с фундаментальной модой сердцевины. После этого на заготовку была нанесён фторированный слой с числовой апертурой 0,3 для создания второй стеклянной оболочки. Это было сделано для переноса границы отражения накачки вглубь ВС, что уменьшает тепловую нагрузку на полимерное покрытие и облегчает процесс механической обработки торца ВС с толстой стороны, куда при помощи объемной оптики вводится излучение накачки.

67



Рисунок 20. ППП конусного BC с внешним диаметром 90 мкм и фотография его торца.



Рисунок 21. Зависимость внешнего диаметра от длины конусного ВС.



Рисунок 22. Результаты измерения параметра качества пучка M² и распределение интенсивности выходного излучения конусного BC в дальнем поле.

Для создания конусного ВС был использован нестационарный процесс вытяжки ВС. Впервые данный метод был предложен в НЦВО РАН в 1991 году [93]. Тогда он был использован для вытяжки относительно длинных (10-1000 м) конусных ВС. Позже, метод был модифицирован для вытяжки коротких (порядка 1 м) конусных ВС [94]. После дополнительных модификаций нестационарный метод вытяжки ВС позволил получать повторяемые наборы из нескольких десятков конусных ВС с вариацией параметров менее 10%. При этом длина переходного участка с быстро изменяющимся диаметром меньше 1 м, а отношение максимального диаметра к минимальному может достигать 7. Распределение внешнего диаметра по длине для конусного ВС изготовленного в рамках настоящей работы представлено на рис. 21. Максимальный внешний диаметр составил 350 мкм, диаметр сердцевины 86 мкм. Диаметр поля фундаментальной моды со стороны толстого конца ВС составил по расчетам 53,4 мкм (площадь поля моды ~ 2240 мкм²) на длине волны 1550 мкм. Для проверки адиабатичности режима распространения излучения по конусному BC был измерен параметр качества пучка M² в конусном ВС, работающем в режим ВУ непрерывного сигнала, при помощи системы измерения Thorlabs M2MS-BP209IR2/M. М² составил 1,26/1,27 для х и у осей соответственно (см. рис. 22), что говорит об отсутствии перекачки энергии из фундаментальной моды в моды высшего порядка.

Схема ВУ на основе конусного ВС представлена на рис. 23. Использовался ВЛ, основанный на ЛД с распределённой обратной связью и ПУ с двумя каскадами усиления на основе ЭВС с накачкой по сердцевине ИИ для создания 80 нс импульсов с частотой повторения 1 кГц. Средняя мощность ИИ составила 4 мВт при пиковой мощности 50 Вт. Длина волны ИИ была равна 1555,6 нм. При этом ширина линии излучения лазерного диода была меньше 2 МГц. Это приводило к тому, что ВРМБ имел наименьший порог в таком ВУ. Излучения ИИ вводилось в тонкий конец конусного ВС при помощи сварки. Накачка от лазерного диода с ВС выходом с 105 мкм сердцевиной вводилась в толстый конец конусного ВС при помощи двух линз. Дихроичное зеркало, отражающее излучения на 1,5 мкм и пропускающее излучения вблизи 1 мкм, было использовано для фильтрации выходного сигнала. Для вывода непоглощённой накачки на тонкой части конусного ВС был создан УВОМ. Выходной торец конусного ВС был полирован под углом 7° для предотвращения обратного отражения.



Рисунок 23. Схема усилителя на основе конусного ВС.

До 45 Вт накачки было введено в конусный ВС, что позволило усилить входной сигнала до средней мощности 1,63 Вт. Доля мощности в УСЛ контролировалась интегрирующим фотодетектором и по измерению спектра. По спектральным измерениям широкий пик УСЛ вблизи 1530 нм содержит в себе 3,5% мощности на максимальной мощности накачки. Измерения интегрирующим фотодетектором показывают, что доля мощности вне импульса (по времени) равна 9% на максимальной мощности накачки. Зависимости пиковой энергии мощности И от мощности накачки представлены на рис. 24 Была получена пиковая мощность 20 кВт без наблюдения импульсной нестабильности, связанной с ВРМБ. При этом энергия в импульсе составила 1,5 мДж. Стоит отметить, что указанные результаты являются рекордными для ЭВУ с накачкой по оболочке. В то же время существенным минусом использованного подхода оказалась крайне низкая эффективность преобразования накачки в сигнал, обусловленная в том числе большим диаметром первой отражающей оболочки с толстого конца, куда вводилась накачка и, соответственно, высоким порогом усиления.



Рисунок 24. а) зависимость пиковой мощности и энергии на выходе конусного ВС от мощности накачки; б) форма импульса на выходе конусного ВС при пиковой мощности 0,5 кВт и 20 кВт.

2.4. Выводы

В данной главе приведены результаты исследований по повышению эффективности и пиковой мощности в ЭВС с накачкой по оболочке. Использование новой ФГАС матрицы стекла сердцевины ЭВС с большой концентрацией алюминия и фтора позволило повысить эффективность ЭВУ с большой пиковой мощностью при накачке на стандартной длине волны 976 нм и для длинноволнового (> 1565 нм) излучения. Разработанная матрица позволила повысить порог ВРМБ в ВУ, состоящем из двух ЭВС с разными матрицами без потери эффективности.

Использование большого соотношения диаметров сердцевины и оболочки позволило продемонстрировать рекордную эффективность 48,7% для многомодового ВС, легированный только эрбием без иттербия с накачкой на 980 нм.

ВС-конус позволил получить излучение с диаметром поля моды 53,4 мкм, что в 3 раза превышает диаметр поля моды в стандартных одномодовых ВС с большим полем моды для излучения в спектральной области около 1,55 мкм, с качеством пучка близким к дифракционно ограниченному (параметр $M^2 = 1,26$). Была продемонстрирована рекордная пиковая мощность для спектрально ограниченных наносекундных импульсов в спектральной области около 1,55 мкм 20 кВт.
Глава 3. Эрбий-иттербиевые волоконные усилители

В данной главе описываются результаты исследования эрбийиттербиевых ВС. Обсуждаются существующие недостатки таких ВС и подходы к их устранению. В первом параграфе представлены результаты разработки одномодовых ЭИВС с высокой эффективностью и их сравнение с коммерчески-доступными образцами. Во втором параграфе рассмотрены наиболее существенные отличия в условиях работы усилителей с большой площадью моды на основе ЭВУ и ЭИВУ, анализируются недостатки присущие каждому из указанных типов ВС В третьем параграфе предлагается путь их преодоления – создания комбинированного эрбиевый/эрбийиттербиевого ВУ и описана реализация такого усилителя. В четвёртом параграфе описана реализация схемы комбинированного усилителя с сохранением поляризации и готового прибора на его основе. Так же в этом параграфе обсуждаются проблемы, связанные с ограничением максимальной пиковой мощности, возникающие в готовом приборе вследствие наличия волоконных компонентов после усилителя.

3.1. Эрбий-иттербиевые волоконные усилители с накачкой по оболочке

Хорошо известно, что только фосфоросиликатная стеклянная матрица позволяет реализовывать эрбий-иттербиевые ВС, обладающие высокой эффективностью преобразования накачки в сигнал. В первую очередь это связано с малым временем жизни на уровне ⁴I_{11/2} ионов эрбия в такой матрице (приблизительно на порядок меньше, нежели в алюмосиликатной матрице [95]), благодаря чему процесс обратной передачи возбуждения от ионов эрбия к ионам иттербия в значительной степени подавлен. Известно, что в фосфоросиликатной матрице увеличение концентрации иттербия приводит к росту эффективности передачи возбуждения от ионов иттербия к ионам эрбия (условно можно рассматривать данный параметр как долю атомов иттербия, связанных с атомами эрбия) [96]. В свою очередь для достижения высокой растворимости иттербия как правило необходимо легирование сердцевины высокой концентрацией оксида фосфора, что приводит к существенному росту показателя преломления (как правило показатель преломления в ЭИВС, обладающих высокой эффективностью, лежит в диапазоне 0.013-0.018). Это, очевидно, не позволяет создавать одномодовые ЭИВС с большой площадью моды. По этой причине существующие конструкции ЭИВС с увеличенным размером сердцевины основаны либо на технике создания трехслойных ВС – когда сердцевину окружает "пьедестал" (отражающая оболочка, относительно которой сердцевина имеет относительно низкую апертуру [97,98]), либо путем создания составной сердцевины, состоящей из большого набора стержней, легированных фосфором, эрбием и иттербием, окруженных стеклом, легированным фтором [99]. В силу технологической сложности изготовления таких структур усилителям на их основе присущи существенные недостатки. Так существующие в настоящее время ЭИВС с пьедесталом демонстрируют высокое качество пучка лишь при использовании специальных техник намотка ВС на катушку малого радиуса и выборочное возбуждение фундаментальной моды при помощи объемной оптики [48,49], но даже в этом случае доля высших мод в выходном излучении не опускается ниже 5% [48] В случае ВС с микроструктурированной сердцевиной даже включение большого количества элементов (37 стержней с высоким показателем преломления) не позволяет получить гладкую форму моды – мода содержит пики в позициях расположения стержней, что приводит к ухудшению качества пучка (M²=1.3-1.5), и так же должно приводить к росту потерь на стыковку такого ВС с обычными ВС со ступенчатым ПП.

Таким образом конструкции ЭИВС с большой площадью моды, существовавшие на момент начала работы над диссертацией имели ряд существенных недостатков, основным из которых являлось недостаточно высокое качество выходного излучения. В рамках настоящей работы было проведено исследование возможности создания одномодовых ЭИВС с большой площадью моды и качеством выходного излучения, ограниченным лишь дифракцией.

Наиболее очевидным решением проблемы высокого показателя преломления сердцевины ЭИВС кажется дополнительное легирование сердцевины фтором, который понижает показатель преломления стекла. В предыдущих работах было продемонстрированно легирование сердцевины до 17 мол. % оксидом фосфора P₂O₅ [100] ($\Delta n \sim 0,015$) и до 3 вес. % фтора [101] ($\Delta n \sim -0.012$). То есть на первый взгляд высокий показатель преломления сердцевины ЭИВС действительно может быть скомпенсирован введением фтора. В то же время на момент проведения настоящего исследования в литературе не было работ, описывающих совместное легирование фосфором и фтором в больших концентрациях. Более того, как показало исследование, проведенное коллегами автора, Д.С. Липатовым и А.С. Лобановым (сотрудники ИХВВ PAH), одновременное введение столь больших концентраций оксида фосфора и фтора в кварцевое стекло методом MCVD невозможно в силу возникающих химических реакций между реагентами. Оптимизация метода MVCD, проведенная Д.С. Липатовым и А.С. Лобановым позволила получить ВС, с сердцевиной легированной до 6,5 мол. % оксида фосфора и до 0,9 вес. % фтора, что обеспечивало показатель преломления самой стеклянной матрицы на уровне ~0.0005 и дальнейший рост ПП сердцевины определялся уже рефрактивностью иттербия.

Используя разработанную методику, был произведён ряд заготовок с сердцевиной, легированной большими концентрациями оксида фосфора и фтора и варьирующимися концентрациями эрбия и иттербия. Заготовки были подвергнуты полировке для придания им квадратного поперечного сечения. Далее, были вытянуты ВС с сердцевиной диаметром 20 мкм и поперечным сечением первой отражающей оболочки в форме квадрата со стороной 110 мкм. Для уменьшения длины волны отсечки был использован W-образный ППП (вокруг сердцевины ВС был создан слой с низким показателем

преломления) [101,102,16]. В результате даже ВС с диаметром сердцевины 20 мкм работали в одномодовом режиме (длина волны отсечки составляла 1,3-1,6 мкм). В процессе вытяжки ВС были покрыты полимером с низким показателем преломления. Числовую апертуру оболочки по отношению к нему равна 0,45, что позволяет использовать ЭИВС со стандартными объединителями сигнала и накачки. ППП и химический состав одного из вытянутых представлены на рис. 25.



Рисунок 25. а) ППП, измеренный анализатором ППП EXFO NR9200HR, и б) химический состав, измеренный сканирующим электронным микроскопом JEOL JSM-5910LV с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, в одном из произведённых ЭИВС.

Для получения максимальной ЭПВ от ионов иттербия к ионам эрбия, расстояние между ними должно быть минимальным, в идеале они располагаться в одном кластере. По этой причине концентрация иттербия должна быть максимальной для увеличения вероятности формирования кластеров [96]. В тоже время, максимальная концентрация иттербия ограничена расстеклованием стекла сердцевины, что приводит к увеличению серых потерь, не зависящих от длины волны. Поэтому сперва была изучена зависимость этих потерь от концентрации иттербия для выявления точки расстеклования. Результаты приведены на рис. 26. 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 (белые точки на рис. 26 в)), где концентрация иттербия была в 1,5-2 раза выше, чем в окружающих областях сердцевины. Такие дефекты выполняют роль рассеивающих центров, что значительно повышает серые потери и делает ЭИВС непригодным для создания ВУ или ВЛ. Таким образом, концентрация иттербия в такой матрице стекла сердцевины должна быть ниже 2 вес. %.

Важно отметить, что концентрация эрбия не имеет никакого влияния на точку расстеклования из-за превышения концентрации иттербия. В частности, ЭИВС с концентрацией иттербия 1,9 вес. % и относительно большой концентрацией эрбия (0,15 вес. %) имеет низкие серые потери - 0,014 дБ/м. В то же время, ЭИВС с концентрацией иттербия 2,3 вес. % и в 5 раз меньшей концентрацией эрбия (~0,03 вес. %) имеет высокие серые потери - 2,5 дБ/м.

Для определения оптимальной концентрации эрбия было проведено исследование ЭПВ между ионами иттербия и эрбия аналогично [96]. Этот параметр характеризует долю ионов иттербия, расположенных достаточно близко от ионов эрбия для передачи возбуждения. Ионы иттербия,



Рисунок 26. а) Зависимость серых потерь на длине волны 1,2 мкм от концентрации иттербия (линия – интерполяция методом сплайна); Изображения, полученные сканирующим электронным микроскопом при концентрации иттербия б) 1,9 вес. % и в) 2,3 вес. %.

расположенные вдали от ионов эрбия, приводят к уменьшению эффективности ЭИВС за счёт генерации или усиления спонтанной люминесценции в спектральной области вблизи 1 мкм. В [96] показано, что ЭПВ монотонно увеличивается с ростом концентрации иттербия и должна составлять примерно 45-65 % (по сравнению с 85-90% для лучших ЭИВС в [96]). Было продемонстрированно, что ЭПВ так же зависит от концентрации эрбия. В частности, для концентраций эрбия 0,1-0,15 вес. % ЭПВ составила 20% и увеличилась до 38% при увеличении концентрации эрбия до 0,3 вес. % (см. табл. 3). В то же время, максимальная концентрация эрбия ограниченна, как и в случае ЭВС, концентрационным тушением люминесценции. Данный эффект становится заметен в ЭИВС при концентрации эрбия 0,1-0,2 вес. % [96].

Для определения оптимальной концентрации эрбия с точки зрения эффективности были изготовлены и исследованы 3 ЭИВС с разной концентрацией эрбия и иттербия. Для сравнения был взят коммерчески доступный ЭИВС компании Nufern LMA-EYDF-25P/300-HE. Концентрация оксида фосфора в сердцевине этого ЭИВС составляет 12 мол. %, иттербия – 7 вес. %, эрбия – 0,45 вес. %. Пьедестал вокруг сердцевины ЭИВС легирован 10 мол. % оксида германия и имеет диаметр в два раза превышающий диаметр сердцевины (50 и 25 мкм соответственно). Числовая апертура сердцевины относительно пьедестала составляет ~0,09. Диаметр поля фундаментальной моды составляет 18 мкм, рассчитанная длина волны отсечки первой высшей моды — 3050 нм. ЭИВС имеет восьмигранное сечение и покрыт полимером с низким показателем преломления, который обеспечивает числовую апертуру оболочки равную 0,46.

В первую очередь ЭИВС были изучены в схеме ВУ с попутной накачкой (см. рис. 27). Несмотря на то, что эффективность ЭИВУ в данной конфигурации оказывается ниже, чем при встречной накачке, она оптимальна при сравнении разных ВС, так как исключает вариации величины эффективности преобразования накачки в сигнал, вызванные потерями на сварку с пассивным ВС в схеме со встречной накачкой или схеме ВЛ. Отсутствие дополнительных ВС, приваренных после тестируемого ЭИВС, позволяет прямое сравнение эффективностей исследуемых ЭИВС в равных условиях. ВЛ со средней мощностью 0,6 Вт на длине волны 1555 нм был использован в качестве источника сигнала. В качестве накачке использовалось излучение стабилизированного по длине волны на 976 ± 1 нм ММ лазерного

Таблица 3. Сравнение различных ЭИВС. Концентрация иттербия измерена сканирующим электронным микроскопом. Концентрация эрбия рассчитана из измерения поглощения слабого сигнала из сердцевины ЭИВС. Эффективность измерена в схеме ВУ с попутной накачкой. Оптимальная длина – длина, при которой получена максимальная эффективность в схеме ВУ с попутной накачкой. УСЛ на 1 мкм – доля УСЛ в спектральной области вблизи 1030 нм (за которую ответственны ионы иттербия) от выходной мощности.

BC	Концентрация, вес. %		ЭПВ,	Эффективность,	Оптимальная	УСЛ на 1 мкм
	иттербия	эрбия	%	%	длина, м	%
ЭИВС1	1,9	0,15	20	19,4	8	21
ЭИВС2	1,7	0,22	25	19,4	5	2
ЭИВС3	0,9	0,34	38	19,2	4,5	0,5
Nufern	7	0,45	90	26,2	1,5	0,05

диода с максимальной мощностью 25 Вт. Излучение накачки и сигнала вводились в тестируемый ЭИВС через 2+1 -> 1 объединитель сигнала и накачки на основе пассивного ВС с диаметром сердцевины 20 мкм, числовой апертурой сердцевины 0,08 и диметром оболочки 125 мкм. Объединитель и ЭИВС были сварены напрямую (место сварки изображено маленьким чёрным квадратом на рис. 27 а). Выходной торец ЭИВС был сколот под углом для предотвращения обратного френелевского отражения. Для измерения сигнала только из сердцевины было изготовлено УВОМ на конце ЭИВС (часть ЭИВС около выходного торца была помещена в иммерсионную жидкость с высоким показателем преломления). Для отделения сигнала от УСЛ, распространяющейся в том же направлении, было использовано ДЗ, которое отражало излучение в спектральной области около 1,55 мкм и пропускало

излучение в спектральной области около 1,03 мкм. Мощность УСЛ, распространяющейся в обратном сигналу направлении, была измерена при помощи 1030/1550 нм ССО, помещённого между ВЛ и объединителем сигнала и накачки. Результаты измерения зависимости выходной мощности сигнала от мощности накачки для оптимальных длин ЭИВС (соответствуют максимальной измеренной эффективности) представлены на рис. 27 б). Интересно отметить, что эффективность для всех трёх ЭИВС была практически одинаковой с учётом погрешности измерения: 19,2-19,4%.

ЭПВ для произведённых ЭИВС изменялась почти в два раза: от 20% для ЭИВС1, легированного 0,15 вес. % эрбия, до 38% для ЭИВС3, легированного 0,34 вес. % (см. таблицу 3). Несмотря на это, увеличение ЭПВ с концентрацией эрбия не приводит к росту эффективности. Это объясняется тем, что положительный эффект увеличения ЭПВ компенсируется концентрационным тушением люминесценции [22]. Большой порог усиления в ЭИВУ3 объясняется большой концентрацией эрбия при малой концентрации иттербия, что приводит к большой доле кластеризации ионов эрбия. В то же время, рост ЭПВ сопровождался падением доли УСЛ ионов иттербия с 21% для ЭИВС1 до 0,5% для ЭИВС3. По этой причине большая концентрация эрбия оказывается предпочтительней.

Коммерчески доступный ЭИВС от компании Nufern имел эффективность 26,2 % в такой же схеме ВУ, что сравнимо с эффективностями разработанных ЭИВС. ЭПВ 90% приводит к уменьшению доли УСЛ иттербия до 0,05%.



Рисунок 27. а) Схема ВУ для тестирования эффективности ЭИВС. б) Зависимость выходной мощности сигнала (сплошные символы) и мощности УСЛ (пустые символы) от мощности накачки в ЭИВС из таблицы 3.

В следующем эксперименте для достижения максимальной эффективности в произведённых ЭИВС была использована схема ВЛ, представленная на рисунке 28 б). В качестве накачки использовались два стабилизированных по длине волны на 976 ± 1 нм диода накачки с суммарной мощностью 80 Вт. После объединителя сигнала и накачки 2 + 1 -> 1 был приварен отрезок пассивного ВС с диаметром сердцевины 20 мкм, оболочки – 125 мкм и числовой апертурой сердцевины 0,06 (ВС был близок к одномодовому на длине волны 1555 нм). В этом ВС была записана ВБР с высоким показателем отражения (~99%) на длине волны 1555 нм. Пассивное

волокно было сварено с тестируемым ЭИВС. Выходным зеркалом резонатора выступал прямой скол тестируемого ЭИВС, который создавал 4% отражения за счёт эффекта Френеля. Эффективность в ВЛ на основе 4,5 м ЭИВС3 составила 34% (см. рис. 28 б). Эта эффективность близка к эффективности 1,5 м ЭИВС Nufern 37% в той же схеме. Однако, вследствие высокой концентрации иттербия в ЭИВС Nufern выходная мощность ВЛ на его основе была ограничена мощностью накачки, которую можно ввести до возгорания полимерного покрытия. Максимальная мощность накачки для данного ЭИВС составила 25 Вт.

Измерения качества пучка показали, что для ЭИВСЗ параметр М² остаётся меньше 1,1 для мощности выходного сигнала 20 Вт см. рис. 28 в), который был ограничен лишь доступной мощностью накачки (около 80 Вт). ВЛ на основе ЭИВС Nufern демонстрировал быстрое ухудшение качества пучка при намотке этого ЭИВС на катушку диаметром 20 см – величина M² вырастала до величины более 2,2 при выходной мощности всего 7 Вт. При намотке ЭИВС на катушку диаметром 8 см M² уменьшился до 1,5, однако такая величина показывает неодномодовость выходного излучения ВЛ. Уменьшение эффективности с 40 %, продемонстрированных в [49] для накачки на 976 нм до 35% в реализованном нами ВЛ связанна по всей видимости с тем, что в настоящей работе нами была реализована полностью волоконная схема и, как следствие неодномодовость генерируемого ВЛ излучения приводила к росту потерь на сварке ВБР с ЭИВС.

Важно отметить, что относительно низкая концентрация фосфора в разработанной матрице (почти в 2 раза меньше чем в коммерчески доступных ЭИВС, высоколегированных фосфором) приводит к низкому порогу расстеклования относительно концентрация иттербия (меньше 2 вес. %). В результате ЭПВ между ионами эрбия и иттербия оказалась относительно малой (<40%) Несмотря на это, доля УСЛ ионов иттербия в спектральной области около 1 мкм является пренебрежимо малой для ЭИВС3. Более того,

уменьшение ЭПВ до 20% не привело к заметному падению эффективности ЭИВС (см. ЭИВС1). Причина данного эффекта заключается в том, что в ЭИВС с большим полем моды (диаметр сердцевины/оболочки – 20/125 мкм) оптимальная длина, требуемая для поглощения большей доли накачки, уменьшается более чем на порядок по сравнению со стандартными ЭИВС (диаметр сердцевины/оболочки – 5/125 мкм). В результате, усиление излучения в спектральной области около 1030 нм оказывается недостаточным для начала лазерной генерации за счет инвертированных ионов иттербия, которые не связаны с ионами эрбия и не передают им свое возбуждение. По этой причине поглощённая ими накачка конвертируется в спонтанную люминесценцию, которая, в отличие от лазерной генерации, не приводит к заметному изменению эффективности из-за его малой скорости (время жизни возбуждённого состояния ионов иттербия составляет 1,4 мс). При интенсивной накачке указанные ионы иттербия "просветляются" - то есть находятся в основном в возбужденном состоянии и практически не поглощают накачку. Соответственно скорость поглощения накачки и оптимальная длина ЭИВС определяется лишь теми ионами иттербия, которые связаны с ионами эрбия – можно сказать, что уменьшение ЭПВ в ЭИВС приводит к снижению "эффективной" концентрации ионов иттербия.

Это видно на примере ЭИВС2 и ЭИВС3, которые имеют практически одинаковые оптимальные длины несмотря на двухкратную разницу в концентрации иттербия. Двухкратное увеличения концентрации иттербия сопровождаемое почти двухкратным падением ЭПВ в данном случае не приводит к существенному увеличению количества ионов иттербия, которые способны передать возбуждение ионам эрбия. Так как только эти ионы играют активную роль в поглощении излучения накачки, оно практически не изменяется между ЭИВС2 и ЭИВС3, и их оптимальная длина остаётся практически равной.



Рисунок 28. а) Схема ВЛ для тестирования эффективности ЭИВС. б) Зависимость выходной мощности ВЛ от мощности накачки в тестируемых ЭИВС. в) Показатель качества пучка М² на выходе ВЛ, измеренный Thorlabs M2MS-BP209IR, от мощности накачки. Вставки - распределения интенсивности выходного излучения ВЛ в дальнем поле, полученные камерой Spiricon SP-1550M.

3.2. Недостатки присущие волоконным усилителям на основе эрбиевых и эрбий-иттербиевых волоконных световодов

В параграфе 3.1 видно, что эффективность ЭИВС в режиме усилителя заметно меньше эффективности ЭИВС в режиме лазера. Это связано с большой мощностью насыщения ЭИВС. Для демонстрации этого факта на рисунке 29 приведены зависимости эффективности от входной мощности – кривые насыщения, для ЭВУ на основе АФС ЭВС из параграфа 2.1 и коммерчески доступного ЭИВУ (Nufern LMA-EYDF-25P/300-HE). 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 [103]. Выходная мощность предусилителя ограничена намного более низким порогом ВРМБ, что приводит либо к низкой эффективности [20], [26], [46], либо к предусилителям с характеристиками и стоимостью близкими к основному усилителю [26], [46]. Схемы со встречной накачкой требуют меньшую входную мощность для насыщения ЭИВУ, однако в этом случае на выходе усилителя необходимо располагать устройство ввода излучения накачки. В полностью волоконных схемах таким устройством служит волоконный объединитель накачки и сигнала, что приводит к появлению дополнительной длины пассивного ВС, в котором развиваются нелинейные эффекты, ограничивающие максимальную пиковую мощность такого ВУ.

С другой стороны, из рисунка 29 видно, что для ЭВУ проблемы насыщения не возникает. Однако, ЭВУ имеют более низкую эффективность. Причинами снижения эффективности являются два фактора. Во-первых, это снижение эффективности преобразования поглощенной накачки в сигнал вследствие кластеризации и, как следствие, возникающей апконверсии. Однако не менее важный фактор – это большая мощность непоглощенной накачки, которая требуется для создания инверсии ионов эрбия, необходимой для усиления сигнала (что обусловлено геометрией ВС). Причем последняя причина наиболее сильно проявляется при усилении коротковолнового сигнала (в С-полосе усиления). Как следствие оптимальная длина ЭВС оказывается заметно меньше, чем длина ВС, на которой поглощается вся накачка. Это приводит к большой доле непоглощённой накачке при оптимальной длине ЭВС. Наглядно это можно увидеть на рисунке 30, где приведена измеренная зависимость мощности накачки и сигнала по длине ЭВУ на основе АФС ЭВС из параграфа 2.1. Видно, что на оптимальной длине сигнала) более 25% (максимальная мощность накачки остаётся непоглощённой. Более того, при уменьшении длины для ЭВС до 1 метра для пиковой мощности 4 кВт в спектрально ограниченном получения наносекундном импульсе [31] 60% накачки остаётся непоглощённой, что приводит к уменьшению эффективности до 5%.



Рисунок 29. Кривые насыщения для ЭВУ на основе 3 м АФС ЭВС из параграфа 2.1 и 0,5 м ЭИВУ (Nufern LMA-EYDF-25P/300-HE).

Таким образом и ЭИВС, и ЭВС показывают низкую эффективность преобразования накачки в сигнал в случае усилителей с высокой пиковой мощностью. В то же время причины низкой эффективности в этих типах ВС разные. Так ЭВС обеспечивает высокое усиление, но имеет низкую эффективность из-за высокой доли непоглощенной накачки. ЭИВС, наоборот, имеет высокую скорость поглощения накачки (в ЭИВС Nufern оптимальная длина составляет 0.8-1.5 метра в зависимости от уровня входного сигнала – смотри Рисунок 30 б), однако при работе с большим коэффициентом усиления показывает крайне низкую эффективность.



Рисунок 30. Измеренные распределения накачки (976 нм) и сигнала (1557 нм) по длине а) ЭВУ на основе АФС ЭВС из параграфа 2.1 и б) ЭИВУ на основе коммерчески доступного ЭИВС Nufern, описанного в прошлом параграфе для двух уровней входной мощности: 300 мВт и 3 Вт.

3.3. Комбинированный эрбиевый/эрбий-иттербиевый усилитель

Основной идеей настоящего параграфа является объединение ЭВС и ЭИВС в одном усилителе с целью компенсировать их недостатки и объединить достоинства. Так, компенсировать слабое поглощение накачки в ЭВУ и, одновременно, требование большой входной мощности в ЭИВУ комбинированный эрбиевый/эрбий-иттербиевый позволяет усилитель, получающийся путём прямой сварки ЭИВС сразу после ЭВС. 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 такой конфигурации работает в значит показывает эффективность режиме насыщения, a высокую преобразования накачки в сигнал. Таким образом, весь комбинированный ВУ должен иметь высокую эффективность и, одновременно низкий порог насыщения по входной мощности (другими словами – показывать высокую эффективность при большом коэффициенте усиления).

Дополнительное преимущество подхода комбинированного усилителя в случае усиления одночастотного излучения – возможность использования ЭВС и ЭИВС с разными составами сердцевины (аналогично параграфу 2.1). Такие ВС имеют разную резонансную частоту ВРМБ, и, соответственно, порог ВРМБ в ВУ определяется наименьшим порогом в одном из ВС с учётом распределения мощности по длине ВУ.

В данном параграфе представлена реализация предложенного комбинированного усилителя и исследована возможность достижения предельно высокой пиковой мощности одночастотного излучения на выходе ВУ при одновременно высокой эффективности преобразования накачки в сигнал. ЭВС, использованный в этом параграфе, был описан раннее в параграфе 2.1 как АФС ЭВС. ЭИВС, использовавшийся в данном параграфе –

коммерчески доступный ЭИВС Nufern LMA-EYDF-25Р/300-НЕ, описанный ранее в параграфе 3.1. Его измеренное поглощение слабого сигнала имеет пик на длине волны 976 нм, величина которого составляет 14,3 дБ/м. Такое высокое поглощение приводит к высокой термической нагрузке на ЭИВС. В дальнейших экспериментах он был намотан на алюминиевый цилиндр, а место сварки с ЭВС дополнительно обдувалось вентилятором. Несмотря на это, максимальная мощность накачки, допустимая без деградации (потемнения с последующим сгоранием) полимерного покрытия составляет 25 Вт. Полная максимальная мощность накачки в таком случае определяется количеством мощности, которую способен поглотить ЭВС, для того чтобы оставить 25 Вт в ЭИВС.



Рисунок 31. Схема комбинированного ВУ и источника длинных импульсов. Ц1, Ц2 – циркуляторы.

Схема комбинированного ВУ представлена на рисунке 31. В качестве источника излучения (ИИ) на входе в комбинированный усилитель использовался импульсный волоконный лазер, схема которого показана на рисунке 33 сверху. В данном случае в качестве затравочного излучения использовалось излучение лазерного диода (ЛД) с распределённой обратной связью, излучающего на длине волны 1554 нм и имеющего ширину линии 2

МГц и максимальную среднюю мощность 1 мВт. ПУ был использован для формирования импульсов из сигнала ЛД – на ПУ подавались периодически следующие импульсы тока обеспечивающего максимальное усиление сигнала (максимальная пиковая мощность на выходе из ПУ составляла 10 мВт). При этом между импульсами сигнал от ЛД, наоборот, поглощался в ПУ, что обеспечивало контраст оптической мощности в усиленном импульсе и между импульсами до 10⁴. Длительность импульса могла варьироваться от 20 нс до нескольких мс (в этой главе от 70 нс до 160 нс). Частоты повторения изменялись от 1 до 100 кГц. При этом, так как ПУ имеет фиксированную пиковую мощность 10 мВт, то средняя мощность генерируемых импульсов на выходе ПУ составила несколько мкВт. Эти импульсы были усилены в двух каскадах усиления, основанных на ЭВС с накачкой по сердцевине (ЭВУ1 и ЭВУ2). Диаметр сердцевины использованного ВУ составляет 5 мкм. Между усилителями присутствовал спектральный фильтр, состоящий из циркулятора Ц1 и ВБР, для отсеивания УСЛ, сгенерированной ЭВУ1 из-за маленького входного сигнала. ЭОМ был использован для придания импульсам заданной формы для компенсации сужения импульса вызванного насыщением усиления в ВУ. После ЭОМа средняя мощность составляла от 0,5 до 2 мВт при пиковой мощности порядка 2 Вт. Полученный сигнал был усилен в ЭВУЗ, в котором использовался ЭВС с большим полем моды и накачкой по оболочке, до средней мощности 80-200 мВт и пиковой мощности до 100 Вт. Циркулятор Ц2, выполненный на основе пассивного ВС с большим полем моды (диаметр сердцевины 20 мкм), и рассчитанный на большую мощность (2 Вт), использовался для контроля излучения из комбинированного ВУ, которое распространялось в обратном направлении. В эту категорию входит УСЛ, распространяющаяся в обратном направлении, рэлеевское рассеяние, усиленное Френелевское отражение от выходного торца и сварок и ВРМБ, которое начинает доминировать при приближении к порогу ВРМБ в комбинированном ВУ.

Излучение ИИ было введено в комбинированный ВУ при помощи 2+1->1 объединителя сигнала и накачки. В качестве накачки использовалось излучение от двух стабилизированных по длине волны на 976 нм ММ ЛД. ЭВС был напрямую приварен к объединителю и ЭИВС. Для предотвращения френелевского отражения от выходного торца ЭИВС использовался расширитель диаметра пучка, представляющий из себя однородный стеклянный цилиндр, длина которого меньше длины, требуемой пучку выходного излучения из ЭИВС для увеличения диаметра до диаметра этого цилиндра. Использование расширителя диметра пучка обусловлено наличием пьедестала в ЭИВС, который имеет большую числовую апертуру и захватывает излучение, отражённое от торца, сколотого под углом. ДЗ использовалось для фильтрации непоглощённой накачки.

Измерения спектра в пассивных ВС с составом сердцевины аналогичным тем, что использовались в данной главе, показали, что спектры ВРМБ ЭВС и ЭИВС не пересекаются. Сдвиг ВРМБ для пассивного ВС, имеющего состав аналогичный ЭВС составил 10,7 ГГц, для ВС с составом аналогичным ЭИВС – 10,2 ГГц.

Оптимальная длина ЭИВС определялась по измерению выходной мощности сигнала при разных длинах ЭИВС для разных входных мощностей. Из рисунка 30 б) видно, что при изменении входной мощности с 0,3 Вт до 3 Вт выходная мощность вырастает с 4 Вт до 11 Вт, что говорит о росте эффективности в 2 раза. При этом видно, что оптимальная длина становится меньше с ростом входной мощности и составляет величину немного большую 0,5 метра. Однако, наклон кривой мощности сигнала от длины близок к нулю в точке 0,5 метров и дальнейшее увеличение длины ЭИВС начинает приводить к существенному снижению порога нелинейных эффектов. По этой причине длина ЭИВС была выбрана равной 0,5 м.



Рисунок 32. Измеренный порог ВРМБ и эффективность в комбинированном усилителе в зависимости от длины ЭВС.

Для выбора оптимальной длины ЭВС была проведена серия измерений в комбинированном усилителе при разной длине ЭВС (см. рис. 32). Измерения порога ВРМБ производились для импульсов длительностью 70 нс по нестабильности, наблюдению начала импульсной выражающейся В осцилляциях вблизи заднего фронта импульса, и по доле мощности, отражённой из-за ВРМБ, измеренной при помощи дополнительного Эффективность преобразования накачки в сигнал циркулятора (Ц2). измерялась при высокой частоте повторения, при которой пиковая мощность была на порядок ниже порога ВРМБ. При нулевой длине ЭВС входной мощности ИИ оказалось недостаточно для насыщения ЭИВУ из-за его низкой эффективности при такой входной мощности (11,6% для 2 мВт) и ограниченной 25 Вт мощности накачки. По измерениям порога ВРМБ для 0,5 и 1 метров ЭВС можно определить, что пороговая мощность в ЭИВС составляет 4 кВт. В то же время если оценить порог ВРМБ независимым способом, учитывая распределение усиленного сигнала в ЭИВС от уровня 1-3 Вт до уровня 5-9 Вт можно получить величину нелинейной длины 28 см. Пороговая мощность появление ВРМБ, рассчитанная по формуле (5) будет равна в этом случае 2,4 кВт. Наблюдение почти в 2 раза большей пороговой величины в эксперименте объясняется высоким неравномерным нагревом ЭИВС вследствие большого квантового дефекта (аналогично описанному в параграфе 1.6.2).

Увеличение длины ЭВС более 1,5 метров не приводит к росту эффективности, поэтому длина ЭВС была выбрана равной 1,5 метра. При длине ЭВС 1,5 м максимальная мощность накачки, при которой до ЭИВС доходит 25 Вт, составляет 45 Вт. Частота повторения была установлена равной 20 кГц, длительность импульсов – 160 нс. Подбор частоты осуществлялся таким образом, чтобы порог ВРМБ наблюдался при максимальной мощности накачки. Доля УСЛ в выходном излучении комбинированного усилителя была измерена интегрирующим фотодетектором [102] и оценена по измерению спектра. При мощности накачки до 40 Вт доля УСЛ составила меньше 1% и выросла до 3% при мощности накачки 45 Вт. Мощность УСЛ в спектральной области вблизи 1 мкм составила меньше 1 мВт. Максимальная выходная мощность составила 9,6 Вт (9,3 Вт при вычете УСЛ). Эффективность равнялась 23,6 %. При максимальной мощности накачки энергия в импульсе составила 460 мкДж (см. рис. 33 а)), а ширина импульса на полувысоте – 157 нс. Форма выходного импульса при максимальной мощности накачки представлена на рисунке 33 б). 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. 33 б)) и по превышению доли мощности, отражённой ВРМБ, величины 0,1%. Параметр качества пучка М², измеренный прибором Thorlabs M2MS-BP209IR/M, составил 1,34/1,35 для х/у осей соответственно. Изображение пучка выходного излучения в дальнем поле (вставка на рис. 33 б)) так же подтверждает хорошее качество пучка.



Рисунок 33. а) Энергия в импульсе и доля мощности, отражённой назад из-за ВРМБ. б) Форма импульса при максимальной мощности накачки; вставка - распределение интенсивности выходного излучения в дальнем поле, полученное камерой Spiricon SP-1550M. в) Спектр ВУ при максимальной мощности накачки.



Рисунок 34. Эффективность от мощности входного сигнала на длине волны 1557 нм для 1,5 м ЭВУ, 0,5 м ЭИВУ и комбинированного усилителя, состоящего из 1,5 м ЭВС и 0,5 м ЭИВС.

Важная характеристика комбинированного эрбиего/эрбий-иттербиегого ВУ – большое усиление для слабого сигнала. Для демонстрации этого достоинства были измерены кривые насыщения (зависимость эффективности от мощности входного сигнала при фиксированной мощности накачки на рис. 34). ЭИВУ длиной 0,5 метра имеет высокую эффективность только при большом входном сигнале в несколько Вт, что в совокупности с ограничением максимальной мощности приводит к маленькой величине усиления в несколько дБ. ЭВУ имеет противоположенные свойства: маленькой мощности входного сигнала (<100 мВт) достаточно для насыщения ЭВУ, но ЭИВУ. максимальная эффективность В разы ниже эффективности Комбинированный эрбий/эрбий-иттербиевый сочетает в себе преимущество обоих подходов – малую мощность насыщения и высокую эффективность.



Рисунок 35. Наклонная эффективность преобразования излучения диодов накачки в сигнальное излучение от максимальной пиковой мощности для импульсных источников или максимальной продемонстрированной средней мощности для источников непрерывного излучения для разных схем накачки. Сплошные символы соответствуют схемам с попутной накачкой, открытые – со встречной. 1 – ЭИВС с накачкой по оболочке на 915-976 нм; 2 – ЭВС с накачкой по оболочке на 976-980 нм; 3 – ЭВС с накачкой по сердцевине на 1480 нм; 4 – ЭВС и ЭИВС с накачкой на 1535; 5 – комбинированный усилитель, представленный в этом параграфе.

При уменьшении порога ВРМБ в комбинированном ВУ возможно получение ещё большей эффективности. Например, при увеличении длины ЭИВС до 1,2 м и ЭВС до 1,8 м была получена пиковая мощность 1 кВт с эффективностью 30,9 %. Для наглядности полученные результаты приведены на сводном графике на рисунке 35. Продемонстрированная эффективность более чем в 4 раза превосходит эффективность только ЭВУ [31] и в 7 раз превосходит эффективность только ЭИВУ [26] для близких пиковых мощностей в спектрально ограниченных наносекундных импульсах.

3.4. Комбинированный эрбиевый/эрбий-иттербиевый усилитель с сохранением поляризации

Реализованная в прошлом параграфе схема не сохраняет поляризацию, что может быть критично для ряда применений. В данном параграфе представлен комбинированный усилитель с сохранением поляризации и созданный на его основе усилительный модуль.

Так как предполагается создание усилительного модуля на основе порог ВРМБ комбинированного усилителя, В нём ограничивается нелинейностью не только самого усилилтеля, но и длиной пассивного ВС в компонентах. Стандартные ВС, использумые выходных В мощных компонентах для спектрального диапазона 1,5-1,6 мкм имеют диаметр сердцевины 20 мкм и диаметр поля моды ~18 мкм. Из-за ограничений сварочного оборудования минимальная длина ВС от сварки до компоненты составляет 15 см, а минимальное расстояние между компонентами – 30 см. Это приводит к порогу ВРМБ 1,2 кВт при наличии одного выходного изолятора (длина ВС после изолятора не понижает порог ВРМБ в ВС до него, так как излучение ВРМБ, распространющееся в обратную сторону от ВС после изолятора, блокируется им). Добавление к изолятору ответвителя для контроля выходных характеристик прибора приводит к понижению порога до 600 Вт. Таким образом, порог ВРМБ в пассивных компонентах оказывается в разы ниже порога ВРМБ в усилителе.

ЭВС, использованный в работе был изготовлен нашей группой. Заготовка ВС была изготовлена методом MCVD. Сердцевина ВС имела АФС матрицу. Для уменьшения чувствительности к изгибу был создан дополнительный легированный фтором слой вокруг сердцевины. В заготовку

были вставлены два боросиликатных стержня для создания двулучепреломления в сердцевине. Диаметр сердцевины вытянутого ВС составил 36 мкм, оболочки – 130 мкм. ВС был покрыт полимером с низким показателем преломления с числовой апертурой 0,45 для обеспечения световедущих условий для накачки, распростороняющейся по оболочке. Фотогравия торца ВС и профиль показателя преломления представлены на рисунке 36. Расчётная длина волны отсечки первой высшей моды составила 1890 нм. Расчётный диаметр поля моды составил 24,7 мкм. Экстинкция при измерении в пасивном режиме (без присутствия излучения накачки) составила > 15 дБ. Пик поглощения слабого сигнала из оболочки на длине волны 976 нм составил 2,2 дБ/м.



Рисунок 36. Профиль показателя преломления и фотография торца ЭВС с боросиликатными стержнями для сохранения поляризации.

В качестве ЭИВС был использован коммерчески доступный аналог ЭИВС, использованного в предыдущей главе, с сохранением поляризации -PLMA-EYDF-25P/300-HE, Nufern.

Схема комбинированного ВУ аналогична приведённой на рисунке 31, но все компоненты выполнены с использованием сохраняющих поляризацию ВС. Отличие схемы ВЛ заключается в использовании ЭВУ с накачкой по сердцевине в качестве третьего каскада усиления (ЭВУЗ) и использование АОМа после третьего каскада усиления для контроля формы испульсов вместо ЭОМа между вторым и третьим каскадами. В результате, ИИ создавал 400 нс импульсы с часотой повторения 10 кГц, средней мощностью 10 мВт и пиковой - 2,5 Вт. Длина ЭВС равнялась 2,9 м, ЭИВС – 0,8 м. К выходу ЭИВС была приварена маленькая длина (20 см) пассивного ВС - аналога Nufer PLMA-GDF-20/130 - с диаметром поля моды 18 мкм и длиной волны отсечки первой высшей моды 2,1 мкм, сколотого под углом 7° для предотвращения обратного отражения. На месте сварки ЭИВС с пассивным ВС было создано УВОМ путём покрытия сварки полимером с выскоим показетелем преломления и числовой апертурой 0,24 и её размещения на теплоотводящей пластинке.

Стоит отметить, что выбранные длины ВС 2,9 м и 0,8м превышают использованные в предыдущей главе– 1,5 м и 0,5 м. Одна из причин - меньшая концентрация (потери в пике поглощения) ионов эрбия в ЭВС для увеличения эффективности его работы за счёт снижения уровня кластеризаци и, соответственно, концентрационного тушения люминесценции. Другая причина –порог ВРМБ 600 Вт в пассивных компонентах. Таким образом длины активных ВС для усилителя были выбраны с целью получения порога ВРМБ немного превышающего эту величину.

Результаты измерений выходных характеристик услителя приведены на рисунке 37. В первую очередь нами была измерена экстинкция на выходе из комбинированнного ВУ путём ввода излучения суперлюминецентного

источника излучения с центром спектра усиления на длине волны 1550 нм шириной по полувысоте равной 20 нм. Экстиникция составила более 11 дБ. Порог ВРМБ измерялся вводом импульсов с частотой поворения 10 кГц от ИИ. Его регистрация производилась по наблюдению ипмульсной нестабильности



Рисунок 37. а) Зависимость выходной мощности от мощности накачки; б) Форма импульса, при котором наблюдается порог ВРМБ; в) Выходной спектр при пороге ВРМБ; г) распределение интенсивности выходного излучения в дальнем поле, полученное камерой Spiricon SP-1550M.

на заднем фронте импульса. Величина порога ВРМБ составила 660 Вт (рис. 37 б). Порог наблюдался при 18 Вт введённой накачки и выходной мощности 2,6 Вт. Одновременно регистрировался выходной спектр для контроля УСЛ. Доля УСЛ составила 1,4% (рис. 37 в). Было проведено измерение качества выходного пучка (пучёк в дальнм поле представлен на рис. 37 г) путём измерения праметра M^2 на Thorlabs M2MS-BP209IR/M. M^2 составил 1,43/1,31, что говорит о хорошем качестве пучка. Так же была измерена эфективность усилителя при увеличении частоты повторения до 100 кГц (рис. 37 а). На зависимости выходной мощности от мощности накачки наблюдается излом при мощности накачки 30 Вт. При этом наклонная эффективность вырастает с 20,6% до 32,9%. Это происходит из-за плохой стабилизации длины волны накачек и наличия в их спектре большой доли излучения (до 60%) с увеличивающейся от тока центральной длиной волны. При мощности накачек 41 Вт центр этого плавающего пика совпадает с пиком поглощения в ЭИВС.

На основе этого усилителя был создан прибор – усилительный модуль, предназначенный для запуска усиленных входных импульсов В коллимированном пучке в атмосферу. Его схема представлена на рисунке 38а). Входной сигнал вводился через адаптер FC/APC. После чего был использован изолятор для защиты источников входного сигнала. После усилителя были добавлены два циркулятора с ответвителем 99/1 между ними. Первый циркулятор выполнял роль поляризатора и изолятора для защиты комбинированного усилителя от ВРМБ в пассивных компонентах. 1% хвост ответвителя использовался для контроля мощности и формы выходного сигнала. Циркулятор 2 применялся для регистрация рассеянного излучения, запущенного через коллиматор в газ/атмосферу. Для улучшения соотношения сигнал шум до 70 дБ перед запуском сигнала в исследуемую среду ставилась четвертьволновая циркулятор 2 пропускал назад обе пластинка, И поляризации, после чего выделялась поляризация перпендикулярная запущенной. Стоит отметить, что компоненты, рассчитанные на большую (> 300 мВт) среднюю мощность, вносят существенные потери, которые в нашем случае составили 3 дБ. Таким образом, в собранном усилительном модуле порог ВРМБ составляет 330 Вт. При этом, использование поляризующего циркулятора позволило повысить экстинкцию до 18 дБ. М2 сохранился на

уровне 1,41/1,37. Был проведён тест долговременной стабильности на протяжении 14 ч (см рис. 38в) при максимальной мощности накачки – 41 Вт. Стандартное отклонение составило 0,014 Вт.

Стоит отметить, что порог ВРМБ 660 Вт был получен для линейно поляризованного излучения и соотвествует ~ 1 кВт для круговой поляризации. Таким образом, продемонстрированная эффективность в ~2 раза превосходит эффективность продемонстрированную для ЭВУ с накачкой по оболочке при сравнимом пороге ВРМБ с поправкой на поляризацию [46] и в 1,8 для ЭИВУ с накачкой по оболочке [47]. В то же время для дальнейшего увеличения пиковой мощности такого усилителя необходима разработка новых пассивных ВС с повышенным порогом ВРМБ, а также создание оптических компонент на основе такого ВС.



Рисунок 38. а) Схема усилительного модуля; б) Усилительный модуль, упакованный в алюминиевый корпус 25х17х4 см; в) Тест долговременной стабильности усилительного модуля

3.5. Выводы

В данной главе приведены результаты оптимизации конструкции ВУ для спектральной области вблизи 1,55 мкм с высокой пиковой мощностью В спектрально ограниченных наносекундных импульсах. Был разработан ЭИВС с эффективностью сравнимой с лучшими коммерчески-доступными ЭИВС и лучшим качеством пучка выходного излучения (M² < 1,1). Была предложена комбинированного новая конструкция полностью волоконного эрбиего/эрбий-иттербиего ВУ, с помощью которого продемонстрирована рекордная эффективность 23,6% для усиления спектрально ограниченных наносекундных импульсов до пиковой мощности около 3.7 кВт. Этот результат более чем в 4 раза превосходит ранее продемонстрированную эффективность для ВУ с таким уровнем пиковой мощности. На примере усилителя для атмосферных лидаров показано, что при реализации полностью волоконных устройств на основе предложенной схемы основным фактором, ограничивающим максимальную пиковую мощность является низкий порог ВРМБ в выходных волоконных компонентах (изолятор, ответвитель, коллиматор и т.п.), что в совокупности с потерями сигнала в указанных компонентах может приводить к снижению порога ВРМБ вплоть до 330 Вт.

Глава 4. Подавление вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в пассивных волоконных световодах

В параграфе 3.3 был создан ВУ с пиковой мощностью 3,7 кВт, однако в параграфе 3.4 при создании готового прибора на основе комбинированного ВУ порог ВРМБ уменьшился до 660 Вт. Это ограничение возникло из-за нелинейности в пассивных выходных компонентах после усилителя, которые необходимы для контроля и доставки излучения ВУ. В данном случае простое увеличение диаметра сердцевины в пассивных ВС не является решением указанной проблемы, так как помимо увеличения порога нелинейных эффектов так же приводит к повышенной чувствительности ВС к изгибу (в случае работы в одномодовом режиме). Как следствие ВС с еще большим поля моды затруднительно использовать решения диаметром ДЛЯ практических задач, где требуются надежные и компактные волоконные лазеры. Таким образом актуальной становится задача повышения порога ВРМБ при заданных оптических характеристиках ВС с большим полем моды.

Необходимо отметить, что проблема низкого порога ВРМБ актуальна не только для ВС с БПМ, используемых в волоконных компонентах. Еще одной актуальной задачей является создание рамановских усилителей одночастотного излучения, где важно обеспечить высокий коэффициент усиления (путем уменьшения размера поля моды), рамановского И одновременно увеличить порог ВРМБ, так как именно данный эффект ограничивает максимальную выходную мощность при усилении одночастотного излучения.

В данной главе описываются результаты исследований по увеличению порога ВРМБ в пассивных ВС, при неизменном оптическом профиле показателя преломления. В первом параграфе представлены исследования треугольного антиволноводного акустического профиля в пассивных ВС. Показана возможность подавления ВРМБ, но также установлены присущие

этому методу ограничения – невозможность применения в случае ВС с БПМ. Во втором параграфе предложена концепция создания неоднородного по радиусу многомодового акустического профиля (за счет изменения состава стекла по радиусу ВС) и показана эффективность данного метода для ВС как с высокой, так и с низкой апертурой. В третьем параграфе впервые показана возможность дальнейшего повышения порога ВРМБ за счет комбинации двух принципиально разных подходов – локального уширения спектров ВРМБ путем создания неоднородного по радиусу многомодового акустического профиля, а также путем внесения неоднородных по длине ВС механических напряжений.

4.1. Волоконный световод с антиволноводным акустическим профилем

В параграфе 1.7 было указано, что сам по себе антиволноводный акустический профиль не является достаточным условием для повышения порога ВРМБ – наилучших результатов предыдущим исследователям удалось добиться, используя треугольный антиволноводный профиль [81]. В то же время максимально достигнутое к настоящему времени подавление ВРМБ в 11 дБ было получено в активном ВС, где сердцевину окружал пьедестал. В BC, несмотря на изначальную многомодовость активном режиме конструкции, усиливал в основном фундаментальную моду. Более того наличие пьедестала позволило обеспечить очень высокий акустически контраст, недостижимый в случае стандартных одномодовых ВС. Целью данного параграфа является выявление факторов, ответственных за увеличение порога ВРМБ в одномодовых пассивных ВС с антиволноводным акустическим профилем.

Для того, чтобы обеспечить плавное изменение акустического показателя преломления по радиусу нами была выбрана конструкция ВС, одновременно легированная оксидом германия и оксидом алюминия. Концентрации оксида германия и оксида алюминия на границе сердцевины и оболочки были подобраны таким образом, чтобы акустический показатель преломления был равен показателю преломления нелегированного кварцевого стекла. Затем концентрация оксида германия уменьшалась, а оксида алюминия - увеличивалась. На оси ВС был легирован только оксидом алюминия. С целью установления влияния формы антиволноводного акустического профиля методом MCVD были созданы две заготовки. В обеих заготовках совместным легированием оксидами алюминия И германия создан неоднородный по радиусу акустический антиволноводный профиль. В 1-й заготовке он имеет "вогнутую" форму, в то время как во 2-й – "выгнутую", близкую к параболической. Профили легирования оксидами алюминия и оксидами германия, а также оптический и звуковой (рассчитанные по формуле $\Delta n_{\rm A} = 1 - n_{\rm A}$, где $n_{\rm A}$ рассчитано по формуле (8)) показатели преломления в изготовленных заготовках представлены на рисунке 39.

Из заготовок было вытянуто три ВС: два с внешними диаметрами 100 и 125 мкм - из 1-й заготовки, и один с внешним диаметром 100 мкм - из 2-й заготовки. Для сравнения были взяты алюмо-, фосфоро-, и германосиликатный ВС с равномерным по радиусу легированием сердцевины и чисто кварцевой оболочкой. В качестве эталона был выбран стандартный телекоммуникационный ВС SMF-28. Сводные характеристики всех этих ВС приведены в таблице 4.

Измерение спектра ВРМБ производилось прямым методом [104] с использованием установки, схема которой представлена на рисунке 40. Сигнал непрерывного ЛД с длиной волны излучения 1555 нм и шириной спектра < 2 МГц (ЛД 1) и мощностью 1,5 мВт усиливается ЭВУ с накачкой по сердцевине до мощности 60 мВт и через циркулятор вводится в исследуемый ВС (ИВС). Навстречу ему, через изолятор и контроллер поляризации, вводится пробное излучение аналогичного ЛД (ЛД 2). Усиленный за счёт ВРМБ сигнал регистрируется фотоприемником. Сопоставление развёртки по времени


Рисунок 39. а) 1-я заготовка. б) 2-я заготовка. Сверху вниз: Профили легирования, измеренные на электронном микроскопе; профили показателя преломления; акустические профили.

к частоте. Достоинством данного метода является то, что он позволяет измерять коэффициент бриллюэновского усиления напрямую. Из-за зависимости ВРМБ от взаимной ориентации поляризации накачки и сигнала полный коэффициент g_в рассчитывается по формуле (6).

Таблица 4. Характеристики ВС, описываемых в параграфе. Измеренный порог и коэффициент бриллюэновского усиления измеренный прямым методом (1) и посчитанный по измеренному порогу (2). Диаметр поля моды приведён для длины волны 1550 нм.

BC	Δn*10 ⁻³	Длина волны отсечки, мкм	Диаметр поля моды, мкм	Поро	г BPMI	5 I _{th} , мВт*мкм ⁻²	gB ₁ ,	gB ₂ , м/Вт*10 ⁻¹²
				Min	Max	(Min + Max)/3	м/Вт*10 ⁻¹²	
SMF-28	5,5	1,26	10,4	40,1	38,5	26,2	13,6	16,0
Р	11	1	7,2	64,3	69,6	44,6	9,6	9,4
Al	8,5	1,06	7,8	59,8	74,2	44,7	7,8	9,4
Ge	8,2	0,9	8,8	38,3	40,9	26,4	13,8	15,9
Al+Ge 1, 100мкм	10	0,98	8,8	82,2	85,3	55,8	5,6	7,5
Al+Ge 1, 125мкм	10	1,2	7,9	64,9	78,4	47,8	7,3	8,8
Al+Ge 2, 100мкм	9,5	1,05	10,1	99,7	117,1	72,3	4,4	5,8



Рисунок 40. Схема установки для измерения спектра ВРМБ

Полученные спектры представлены на рисунке 41. Видно, что спектры ВС, не обладающих акустической антиволноводной структурой (P, Al, Ge, SMF-28) имеют один ярко выраженный пик, тогда как спектры исследуемых ВС (Al+ Ge, 1 и 2) имеют два соизмеримых пика, наличие которых обусловлено взаимодействием оптической моды с акустическими модами сердцевины и оболочки. Можно видеть, что уширение спектра ВРМБ сопровождается уменьшением максимального усиления. Так, в разработанных ВС с неоднородной акустической антиволноводной структурой Al + Ge 2, 100 мкм, Al + Ge 1, 100 мкм и Al + Ge 1, 125 мкм максимальные коэффициенты составили (4,4, 5,6 и 7,3) × 10⁻¹² м/Вт соответственно. В то же время максимальный коэффициент усиления ВС с равномерным легированием сердцевины составил (13,8, 13,6, 9,6 и 7,8) × 10⁻¹² м/Вт для Ge, SMF-28, P и Al соответственно. Таким образом, в лучшем ВС Al + Ge 2, 100 мкм коэффициент усиления ВРМБ в 3,1 раза меньше, чем в стандартном телекоммуникационном ВС SMF-28.

Помимо измерения спектров усиления ВРМБ так же было проведено прямое измерение порога ВРМБ в исследуемых световодах. Схема установки показана на рисунке 42. Источником сигнала служил непрерывный узкополосный (ширина линии излучения < 2 МГц) ЛД с распределённой обратной связью длиной волны 1555 нм. Было использовано два ЭВУ с



Рисунок 41. Спектры ВРМБ.



Рисунок 42. Схема установки для измерения порога ВРМБ.

накачкой по сердцевине на длине волны накачки 1460 нм (ЭВУ1 и ЭВУ2) и один с длиной волны накачки 980 нм (ЭВУ3). Из излучения ЛД, усиленного в ЭВУ1, при помощи АОМ вырезались импульсы длительностью 500 нс с частотой следования 2 кГц. Из-за большой скважности в АОМ средняя мощность таких импульсов составляла ~30 мкВт, поэтому после их усиления в ЭВУ2 использовался узкополосный ССО с шириной полосы пропускания ~1 нм для фильтрации УСЛ. После чего ЭВУЗ повышал среднюю мощность до 30 мВт (пиковая – 30 Вт). Форма управляющего акустооптическим модулятором сигнала подбиралась таким образом, чтобы выходной импульс после ЭВУЗ имел форму, близкую к прямоугольной. Однако сделать это можно было только для фиксированных параметров усилителей. Поэтому для управления мощностью в ИВС использовался аттенюатор, созданный разведением сколотых под прямым углом ВС и созданием между ними воздушной прослойки с переменным расстоянием. Это потребовало дополнительного изолятора на выходе ИИ и ответвителя 99/1 для контроля введённой в ИВС мощности. Для предотвращения отражения от выходного конца ИС к нему был приварен отрезок многомодового ВС ММ (60/125 мкм). Сигнал отражённый за счёт ВРМБ регистрировался при помощи циркулятора. Порог ВРМБ измерялся для ВС длиной 50 м. Следует отметить, что пространственная длина импульса при его длительности в 500 нс составляет примерно 100 м. Таким образом, данные измерения проводились в квазинепрерывном режиме. Порог фиксировался при превышении отраженным сигналом 1% от введенной в ИВС мощности.

Как уже отмечалось в параграфе 1.5, порог ВРМБ зависит от поляризации излучения. В данном случае минимальный порог I_{th} достигается при линейной поляризации излучения, а максимальный ($2I_{th}$) – для круговой. Наличие неконтролируемого двулучепреломления в ИВС приводит к тому, что поляризация не будет сохраняться вдоль его длины. Учесть данный факт можно, введя фактор x (0 < x < 0,5), соответствующий «деполяризации»

излучения в ИВС. Таким образом, максимальный порог (поляризация близка к круговой) соответствует $I_{max} = (2 - x) \times I_{th}$, а минимальный (поляризация близка к линейной) – $I_{min} = (1 + x) \times I_{th}$, где I_{th} – порог для линейной поляризации. С учетом измеренных порогов оценивался коэффициент усиления по формуле [105]:

$$g_B = \frac{21}{l \times I_{th}} = \frac{21}{\frac{l}{3} \times (I_{max} + I_{min})}$$

где l = 50 м — длина ИВС.

В качестве примера на рисунке 43а) показаны характерные зависимости отраженного сигнала от плотности мощности накачки для ВС Ge, измеренные для двух положений контроллера поляризации, при которых обеспечивались максимальный и минимальный пороги ВРМБ, а также расчётные зависимости в случае линейно поляризованного излучения (жирная кривая) и излучения с круговой поляризацией (штриховая кривая). На рисунке 43б) представлены рассчитанные зависимости для линейной поляризации излучения во всех исследуемых ВС. Откладывание по оси абсцисс интенсивности введенного излучения исключает влияние диаметра поля моды в ИВС на результаты сравнения. Данное утверждение легко проверить, сравнив пороги для ВС Ge и SMF-28 с сердцевиной, легированной оксидом германия, у которых Δ п сердцевины и площадь поля моды различаются почти в полтора раза. Тем не менее, пороги ВРМБ в данных ВС практически идентичны.

Оценка максимального коэффициента усиления ВРМБ дублирует более точные прямые измерения коэффициента усиления, описанные выше, и показывает, что погрешность расчета порога ВРМБ через коэффициент усиления может достигать 10%–20%.



Рисунок 43. Зависимости отраженного сигнала от интенсивности в сердцевине BC: а) измеренные при двух крайних положениях контроллера поляризации (цветные кривые) и рассчитанные для случая линейной (жирная кривая) и круговой (штриховая кривая) поляризаций излучения; б) рассчитанные зависимости для случая линейной поляризации для всех ИВС.

BC сердцевины Для равномерным легированием с фосфоросиликатного и алюмосиликатного (формально с антиволноводным акустическим профилем) – порог ВРМБ практически одинаков и составляет около 53,6 мВт/мкм², что в 1,7 раза больше порога для германосиликатных ВС, составляющего ~31,5 мВт/мкм². Для разработанных ВС с неоднородным акустическим профилем порог ВРМБ антиволноводным оказался существенно выше и составил 57,3 (для Al + Ge 1,125 мкм), 67,0 (для Al + Ge 1, 100 мкм) и 86,7 мВт/мкм² (для Al + Ge 2, 100 мкм). Таким образом, максимальное полученное повышение порога ВРМБ составило 4,4 дБ по сравнению с порогом для стандартного BC SMF-28. В Al + Ge 2, 100 мкм диаметр поля моды для длины волны 1550 нм равен диаметру поля моды в SMF-28, а значит, этот BC может быть успешно использован для замены SMF-28 в приложениях, чувствительных к ВРМБ.

Проведенное исследование спектров ВРМБ в ВС, обладающих как волноводной, так и антиволноводной акустической структурой (см. Таблицу 4), показало, что равномерное по радиусу легирование сердцевины ВС не позволяет существенно увеличить порог ВРМБ даже в ВС с антиволноводным акустическим профилем (алюмосиликатный ВС). В то же время, неравномерный по радиусу антиволноводный акустический профиль, сформированный совместным легированием оксидами алюминия и оксидами германия, позволил заметно (примерно в 3 раза) повысить порог ВРМБ. Важно отметить, что «вогнутый» треугольный акустический профиль (заготовка 1) оказался менее эффективным для подавления ВРМБ, чем «выпуклый», близкий к параболическому. Хотя ранее уже указывалось, что в ВС с треугольным антиволноводным профилем возможно подавление ВРМБ [75,81], в рамках работы проведённой в данной главе впервые показано, что наличие неравномерного акустического профиля является необходимым условием для повышения порога ВРМБ в ВС. Более того, даже в этом случае эффективного подавления ВРМБ удается добиться лишь при определенных волноводных параметрах ВС, так как спектр ВРМБ имеет сильную зависимость от диаметра сердцевины. Продемонстрировано повышение порога ВРМБ на 4.4 дБ по сравнению с порогом германосиликатного BC SMF-28, имеющего такой же диаметр поля моды.

К недостаткам исследованного метода подавления ВРМБ стоит отнести тот факт, что максимальное подавление ВРМБ было достигнуто при длине волны отсечки приблизительно в полтора раза меньше рабочей длины волны. Это приемлемо для рассмотренных нами ВС с большим Δn, но не допустимо в случае ВС с уменьшенной апертурой. В таких ВС короткая длина волны отсечки неизменно будет приводить к крайне высокой чувствительности к изгибу. Таким образом для ВС с низкой апертурой необходимо искать другой подход к подавлению ВРМБ.

4.2. Волоконный световод с несколькими пиками в спектре вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна

Кардинально иным подходом к подавлению усиления ВРМБ является создание ВС с акустически волноводной сердцевиной в поперечном сечении области разного состава, которого присутствуют имеющие разные резонансные частоты усиления ВРМБ. Так в работе [82] был реализован ВС, стержней трех разных сердцевина которого состояла ИЗ составов, расположенных гексагонально (центральный стержень и шесть стержней, расположенных вокруг). Авторам удалось продемонстрировать присутствие в спектре усиления ВРМБ трех пиков, соответствующих каждому из типов стержней, но не удалось добиться равной интенсивности пиков и, соответственно, существенного подавления усиления ВРМБ. Так же стоит отметить крайнюю сложность реализации такой технологии, так как она требует изготовления как минимум трех заготовок разного состава и их последующей консолидации.

В рамках этого параграфа метод модифицированного осаждения из газовой фазы используется для формирования нескольких областей разного состава в поперечном сечении ВС. Интенсивность каждого из пиков в этом случае может контролироваться толщиной каждой из осажденных областей, а их количество и максимальное расстояние между ними – максимальным контрастом Δn_A . По этой причине центр сердцевины было решено легировать только алюминием, а слои на границе сердцевина-оболочка – только германием. Как было указано ранее – контроль за высотой пиков в спектре усиления ВРМБ, возможен путем выбора соответствующей каждому из слоёв ширины. В первом приближении оказалось достаточным установить ширину каждого слоя таким образом, чтобы уравнять оптическую мощность, распространяющуюся по каждому из слоёв. Можно ожидать, что коэффициент

усиления ВРМБ g_в уменьшится во столько раз, сколько пиков одинаковой высоты будет присутствовать в спектре ВРМБ.

4.2.1. Волоконный световод с малым полем моды

Методом MCVD была произведена заготовка для вытяжки BC с малым диаметром поля моды. На рисунке 44 изображены распределение электрического поля, ППП, профиль легирования и профиль акустического показателя преломления для BC с внешним диаметром 125 мкм, вытянутого из произведённой заготовки. Ширина слоёв было оптимизирована для внешнего диаметра 125 мкм. Из заготовки было вытянуто 4 BC с внешними диаметрами 80, 100, 125 и 135 мкм. Характеристики BC приведены в таблице 5

Измерения спектра проводились прямым методом, как и в предыдущей главе, однако установка была усовершенствована. Схема доработанной установки для измерения спектра ВРМБ представлена на рисунке 45. В данном случае используется излучения только одного узкополосного непрерывного ЛД с распределённой обратной связью. При этом пробный сигнал получается за счёт модуляции в ЭОМ половины усиленного ЭВУ с накачкой по сердцевине излучения ЛД на частотах от 8 до 12 ГГц. Такая модуляция создаёт три спектральных компоненты в спектре модулированного сигнала: две компоненты с уменьшенной и увеличенной на частоту модуляции частотами компонента с исходной частотой. Центральная и высокочастотная И компоненты отсеиваются при помощи циркулятора Ц1 и длинной ВБР с шириной спектра <0,1 нм (~12 ГГц). В результате сканирующее излучение имеет мощность ~ 2 мВт. В качестве накачки использовалась другая половина излучения ЛД, которая была дополнительно усилена в ЭИВУ с накачкой по оболочке. Это позволило увеличить максимальную мощность накачки до 600 мВт для измерения меньших длин ВС, что позволяет уменьшить влияние неоднородностей, возникающих по длине ВС. Излучение накачки и сканирующего сигнала вводится в ИВС при помощи двух циркуляторов Ц2 и ЦЗ. Усиленное в ИВС за счёт ВРМБ сканирующее излучение регистрируется

118

фотоприёмником из третьего порта ЦЗ. Как упоминалось в предыдущей главе, измеренное значение g_в зависит от взаимной поляризации сигнала и накачки, что в случае ИВС без сохранения поляризации требует присутствия контроллера поляризации.



Рисунок 44. а) Распределение мощности фундаментальной моды и ППП; б) Профили легирования; в) Рассчитанный профиль акустического показателя преломления для ВС с малым диаметром поля моды и внешним диаметром 125 мкм.

Таблица 5. Характеристики ВС, описываемых в параграфе. Порог ВРМБ приведён для 1 метра ВС. Диаметр поля моды приведён для длины волны 1550 нм.

BC	Диаметр поля моды, мкм	Площадь поля моды, мкм ²	Длина волны отсечки, нм	Р _{th} , Вт	I _{th} , Вт/мкм ²	g _в , м/Вт*10 ⁻¹²
ВС с малым диаметром поля моды						
SMF-28	10,4	85,0	1260	74,8	0,9	15,8
135 мкм	5,7	25,2	1560	97,6	3,9	3,6
125 мкм	5,5	24,0	24,0 1450 78		3,3	4,3
100 мкм	5,4	23,2	1160	45,6	2,0	7,2
80 мкм	6,0	28,2	930	33,5	1,2	11,8
ВС с большим диаметром поля моды						
Ge	20,4	326,5	1830	290	0,9	14,5
150 мкм	20,4	325,9	2180	620	1,9	4,4
125 мкм	18,5	267,9	1790	410	1,5	5,2
110 мкм	17,5	239,4	1580	370	1,5	6,1
100 мкм	16,9	225,4	1430	240	1,1	5,8
Многослойный ВС						
150 мкм	20,4	326,9	2330	790	2,4	5
125 мкм	18	254,5	1930	685	2,7	3,8
110 мкм	16,9	224,3	1700	605	2,7	5,4
100 мкм	16,3	208,7	1540	370	1,8	6,1



Рисунок 45. Схема установки для измерения спектра ВРМБ.

Измеренные спектры ВРБ представлены на рисунке 46. Для сравнения так же были проведены измерения стандартного телекоммуникационного германосиликатного BC Corning SMF-28. Для изготовленных BC в спектре ВРМБ присутствуют три пика: левый пик, соответствующий германосиликатному слою на краю сердцевины ВС; средний пик, соответствующий алюмо-германосиликатному слою в середине сердцевины ВС; правый пик, соответствующий алюмосиликатному слою на оси сердцевины ВС. Как и планировалось, амплитуды пиков практически совпали при внешнем диаметре BC 125 мкм. В BC с внешним диаметром 135 мкм присутствует дополнительный пик, вызванный вытекающими акустическими модами. Так же влияние этого пика заметно при внешнем диаметре 80 мкм за счёт уширения правого пика.

Дополнительно были проведены измерения порога ВРМБ в данных ВС методом, описанным в параграфе 4.1. Длина ВС при измерении порога была равна 50 метрам. Результаты измерений приведены в таблице 5. Минимальное значение коэффициента усиления ВРМБ g_в было получено в ВС с внешним диаметром 135 мкм – 3,6 м/Вт * 10⁻¹², что в сравнении с 15,8 м/Вт *10⁻¹² для SMF-28 говорит о подавлении ВРМБ на 6.4 дБ.



Рисунок 46. Измеренные спектры ВРМБ для ВС с малым диаметром поля моды и Corning SMF-28.

4.2.2. Волоконный световод с большим диаметром поля моды

В параграфе 3.4 пиковую мощность усилителя ограничивал пассивный ВС в выходных компонентах. По этой причине пиковая мощность уменьшилась более чем в 3 раза по сравнению с параграфом 3.3. Единственный способ дальнейшего увеличения пиковой мощности без использования объёмной оптики - использование пассивных ВС с увеличенным порогом ВРМБ.

По аналогии с предыдущим параграфом, методом MCVD была создана заготовка с сердцевиной, состоящей из трех слоев, легированных в разном соотношении алюминием и германием. Концентрация добавок была уменьшена для того, чтобы снизить числовую апертуру до величины ~0,09, что необходимо для сохранения одномодовости в BC с диаметром сердцевины 20 мкм. Ширина слоёв была оптимизирована для внешнего диаметра 125 мкм м диаметра сердцевины 20 мкм. Из заготовки было вытянуто 4 BC с внешними диаметрами 100, 110, 125 и 150 мкм. Параметры BC представлены в таблице 5.

Одномодовый режим распространения излучения на длине волны 1550 нм в ВС с длиной волны отсечки больше 1550 нм был достигнут за счёт слабого изгиба и соосной сварки. Из-за уменьшения числовой апертуры до 0,09, Δn была уменьшена до 0,003 и Δn_A была уменьшена соответственно. ППП, профили легирования и профиль акустического показателя преломления приведены на рисунке 47.

Для измерения спектров ВРМБ в вытянутых ВС была использована установка описанная в 4.2.1. Для сравнения был взят германосиликатный (Ge) ВС с диаметром сердцевины 20 мкм. Измеренные спектры ВРМБ представлены на рисунке 48.

Стоит отметить, что ВС с большим полем моды имеют в несколько раз меньшее усиление ВРМБ при той же длине. По этой причине при измерении спектра ВРМБ маленькая длина (~1-2 м) SMF-28, использовавшаяся для доставки излучения в ИВС, имеет сравнимое усиление ВРМБ. В связи с этим все измеренные спектры имеют дополнительный пик на частоте 10,75 ГГц, который вызван только наличием SMF-28 в схеме измерительной установки. Германосиликатный ВС имеет один пик усиления, в то время как изготовленные ВС имеют два пика. Наличие только двух пиков вместо трёх объясняется малым Δn_A , недостаточным для поддержания больше одной акустической моды. Второй пик соответствует вытекающей акустической моде. По измерениям спектра получено уменьшение g_B с 14,5 для германосиликатного ВС до 4,4 для ВС с внешним диаметром 150 мкм, что говорит о подавлении ВРМБ на 5,2 дБ.



Рисунок 47. a) Распределение мощности фундаментальной моды и ППП; б) Профили легирования; в) Рассчитанный профиль акустического показателя преломления для ВС с большим диаметром поля моды и внешним диаметром 125 мкм.



Рисунок 48. Измеренные спектры ВРМБ для ВС с большим диаметром поля моды и германосиликатного ВС (Ge). Пик на частоте 10,75 ГГц вызван наличием SMF-28 в схеме измерительной установки.



Рисунок 49. Схема установки для измерения порога ВРМБ в ВС с большим полем моды по наблюдению импульсной нестабильности.

Так же были измерены пороги ВРМБ для всех ВС. Из-за увеличенного поля моды порог ВРМБ в таких ВС на порядок превосходит величину порога ВРМБ в ВС со стандартным размером сердцевины. По этой причине использовалась другая установка для измерения порога ВРМБ, а его регистрация осуществлялась по наблюдению импульсной нестабильности, которая выражалась появлением случайных колебаний на заднем фронте импульса. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 49. Для увеличения пиковой мощности последний каскад усиления ЭВУЗ основан на ЭВС с большой сердцевиной и накачкой по оболочке. В таком усилителе порог ВРМБ для 80 нс импульсов составляет ~ 4 кВт. Такие импульсы создавались из излучения ЛД с распределённой обратной связью, излучающего на длине волны 1555 нм с шириной линии <2 МГц, при помощи ПУ с частотой повторения 2,45 кГц. Два каскада усиления ЭВУ1 и ЭВУ2 усиливали сигнал после ПУ со средней мощностью 2 мкВт (пиковая – 10 мВт) до 2 мВт. Два фильтра на основе длинных ВБР со спектральной шириной на полувысоте менее 0,1 нм и циркуляторов использовались для отсеивания УСЛ. Перед ЭВУЗ был установлен контроллер поляризации. ИВС был сколот под углом для предотвращения обратного отражения.



Рисунок 50. Измеренный порог ВРМБ в зависимости от длины ВС.

Результаты измерений приведены на рисунке 50. Порог ВРМБ был измерен для ВС разной длины L от 1 до 6 м и был аппроксимирован зависимостью P_{th} ~ 1/L. Аппроксимированные величины порогов ВРМБ для одного метра ВС представлены в таблице

Максимальная величина порога составила 620 Вт для ВС с внешним диаметром 150 мкм. Порог для германосиликатного ВС составил 290 Вт. Так как диаметр поля моды в данных ВС идентичен, порог ВРМБ в разработанном ВС увеличен на 3,3 дБ. Величина подавления ВРМБ по измерениям порога отличается от величины, полученной из спектральных измерений. Это вызвано разной шириной спектра ВРМБ и, соответственно, разной зависимостью порога ВРМБ от длительности импульса (длительность импульса в эксперименте ограничена 80 нс).

4.2.3. Волоконный световод с многослойной сердцевиной

Логичное развитие подхода, описанного в предыдущем параграфе – увеличение количества слоёв для создания плавного изменения Δn_A от центра сердцевины до её края. Это приведёт к увеличению ширины всего спектра ВРМБ (расстояния между крайними пиками) и увеличит их число, так как они соответствуют направляемым акустическим модам ВС. В случае применения метода MCVD для создания заготовки ВС это достигается изменением соотношения легирующих добавок в каждом из слоёв. Дополнительно увеличить Δn_A возможно за счёт введения в крайние слои сердцевины увеличивающегося количества фтора.

Для проверки данного предположения была изготовлена заготовка ВС с многослойной сердцевиной. Из неё было вытянуто 4 ВС с внешними диаметрами 150, 125, 110 и 100 мкм. ППП, профили легирования и профиль акустического показателя преломления в ВС, с внешним диаметром 125 мкм, представлены на рисунке 51.

В вытянутых ВС были измерены спектры ВРМБ методом, описанным в главе 4.2.1. Результаты измерений представлены на рисунке 52. Сглаживание профиля акустического показателя преломления и увеличение максимального Δn_A привели к увеличению количества пиков, соответствующих ведомым акустическим модам до 4-5. В спектре так же присутствуют два пика, соответствующий вытекающим акустическим модам (с частотами больше 11 ГГц). Это приводит к уменьшению пикового значения g_B до 3,8 Вт/м*10⁻¹²

для BC с внешним диаметром 125 мкм, что по сравнению с германосиликатным BC даёт подавление BPMБ на 5,8 дБ.



Рисунок 51. а) ППП; б) Профили легирования; в) Рассчитанный профиль акустического показателя преломления для ВС с внешним диаметром 125 мкм.



Рисунок 52. Измеренные спектры ВРМБ для многослойного ВС и германосиликатного ВС (Ge).

Так же было проведено измерение порога ВРМБ методом, описанным в параграфе 4.2.2. Результаты представлены в таблице 5. Максимальный порог для одного метра ВС составил 790 Вт для ВС с внешним диаметром 150 мкм, однако максимальная интенсивность была получена для ВС с внешним диаметром 125 мкм. Таким образом порог ВРМБ увеличен на 4,8 дБ.

4.3. Комбинированный метод подавления вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна

В рамках предыдущего параграфа нами был разработан новый подход к подавлению ВРМБ – использование неоднородного профиля легирования ВС многомодового акустического профиля И ДЛЯ создания сохранения оптического профиля одномодовым. Очевидно, что этот подход ограничен количеством распространяющихся в сердцевине акустических мод, которое определяется диаметром сердцевины и акустическим контрастом. Это наиболее критично для ВС с маленьким диаметром сердцевины. Однако, большое расстояние между пиками в спектре ВРМБ в таких ВС открывает возможность дополнительного подавления ВРМБ за счёт уширения каждого пика путём изменения сдвига ВРМБ каждого пика по длине ВС методами, описанными в параграфе 1.6. В случае, когда величина уширения не превышает расстояния между пиками, подавление ВРМБ, вызванное каждым методом, оказывается мультипликативным. Например, если один метод повышает порог ВРМБ на 4 дБ, а второй – на 6 дБ, то можно ожидать полное повышение порога на 10 дБ при совместном использовании данных методов.

Стоит отметить, что применимость методов, основанных на изменении сдвига ВРМБ по длине ВС совместно с методами, основанными на локальном уширении спектра ВРМБ ограниченно ВС с малой сердцевиной. Так, для ВС с большим диаметром сердцевины большое количество направляемых акустических мод приводит к маленькому расстоянию между ними. В таком эффект случае ОТ использования первых методов окажется мультипликативным для малого диапазона сдвигов частот. А при превышении

уширения каждого пика расстояния между ними суммарное подавление ВРМБ перестаёт быть мультипликативным, а ширины спектра растёт так, как – будто бы в спектре ВРМБ присутствует только один пик.

В данном параграфе описывается практическая реализация идеи комбинирования методов. Для реализации изменения сдвига частоты ВРМБ по длине ВС предложена принципиально новая конструкция ВС со смещенной сердцевиной, который наматывается на катушку малого радиуса (параграф 4.3.1), а затем оба метода (создание ВС с малым количеством удалённых пиков в спектре ВРМБ и неравномерное по длине растяжение сердцевины ВС) применяются совместно (параграф 4.3.2).

4.3.1. Волоконный световод со смещённой сердцевиной.

предложенного метода подавления ВРМБ BC путём Идея В неравномерного растяжения сердцевины по длине ВС заключается в следующем: сердцевина ВС существенно смещается к краю оболочки, а сам ВС наматывается на катушку маленького диаметра. Это позволяет создать периодический градиент деформации в сердцевине ВС без сложных систем, описанных в параграфе 1.6.3. В такой схеме сердцевина ВС претерпевает периодической растяжение и сжатие (рис. 53), что позволяет удвоить сдвиг ВРМБ при той же деформации по сравнению со случаем, когда происходит только растяжение ВС. Таким образом, максимальная деформация для получения одного и того же уровня уширения спектра ВРМБ уменьшается вдвое, что положительно сказывается на долговременной прочности ВС.

Заготовка ВС была произведена методом MCVD. Сердцевина была легирована 24 мол.% GeO₂, что соответствует $\Delta n = 0.035$. Она была нахлопнута, затем сполирована, с одной стороны, с тем чтобы получить сердцевину, существенно смещенную от оси ВС. После вытяжки ВС диаметром 125 мкм сердцевина имела диаметр 8 мкм, при этом ее ось находилась на расстоянии 13 мкм относительно края оболочки (рис. 54а).

Рассчитанный диаметр поля фундаментальной моды на длине волны 1550 нм составил 6,7 мкм, длина волны отсечки второй моды составила 1750 нм. Данный ВС не является строго одномодовым на рабочей длине волны 1555 нм, однако его предполагаемое использование в условиях большого изгиба при намотке на катушку малого диаметра приводит к большим потерям для высших мод и эффективно одномодовому режиму работы. Для улучшения прочности и долговременной надёжности ВС помимо полимерного покрытия непосредственно на ВС наносилось так же герметичное углеродное покрытие [106]. Это позволило намотать ВС на катушку с внешним диаметром 28 мм без риска обрывов ВС на протяжении его срока службы.



Рисунок 53. Схема намотки ВС со смещённой сердцевиной.

Основная сложность при использовании ВС со смещённой сердцевиной – сварка со стандартными ВС. Так как несоосная сварка ВС приводит к смещению сердцевин свариваемых ВС к общей оси, сварка производилась при низком токе и длительности дуги. Кроме того, дополнительная компенсация дрейфа производилась в процессе выравнивания ВС. Фотография сварки ВС со смещённой сердцевиной со стандартным ВС представлена на рисунке 546).

Оптимизация процесса сварки позволила получить потери на одну сварку менее 0,2-0,3 дБ.



Рисунок 54. a) фотография торца BC со смещённой сердцевиной; б) фотография сварки BC со смещённой сердцевиной со стандартным BC.



Рисунок 55. Схема установки для измерения спектра ВРМБ.

Схема установки для измерения спектра ВРМБ представлена на рисунке 55. Её отличие от схемы установки в главе 4.2.1 заключается в том, что пробное (слабое) излучение не сканируется по частоте, а модулируется на низкой частоте при помощи ЭОМ2, что позволяет использовать синхронное детектирование на фотоприёмнике для увеличения точности измерения. Вместо сигнального излучения по частоте сканируется излучение накачки.

Были произведены измерения спектра ВРМБ для относительно недеформированного ВС длинной 50 м, намотанного на катушку диаметром 180 мм и деформированного намоткой на катушку диаметром 28 мм. При таком диаметре намотки суммарная деформация растяжения и сжатия составила 0,7%. Результаты измерений спектра ВРМБ приведены на рисунке 56. Ширина на полувысоте для недеформированного ВС составила 78 МГц при пиковом значении усиления 24 м/Вт*10⁻¹². При намотке ВС на катушку диаметром 28 мм ширина на полувысоте увеличилась до 272 МГц и пиковое усиление уменьшилось до 9,3 м/Вт*10⁻¹². Стоит отметить, что сдвиг ВРМБ пропорционален деформации ВС в положительную сторону в случае растяжения и в отрицательную в случае сжатия. Таким образом, два пика в спектре ВС, намотанного на катушку с диаметром 28 мм, отвечают положениям ВС на катушке, при которых сердцевина имела наибольшее сжатие (левый пик) и максимальное растяжение (правый пик). Из-за невозможности точного контроля поворота ВС относительно своей оси, большая его часть оказалась ориентирована смещённой сердцевиной к центру катушки. Это привело к перекошенности спектра ВРМБ и уменьшению максимального подавления ВРМБ до 4,1 дБ.



Рисунок 56. Измеренный спектр ВРМБ в ВС со смещённой сердцевиной.

4.3.2. Комбинированный метод подавления вынужденное рассеяния Мандельштама-Бриллюэна

случаем для применения комбинированного Идеальным метода уширения спектра ВРМБ является использование ВС со спектром ВРМБ, содержащим несколько пиков, аналогичным описанному в параграфе 4.2.1. Методом MCVD была разработана заготовка с профилем легирования аналогичным ВС в параграфе 4.2.1. Однако, была уменьшена концентрация легирующих добавок (GeO₂ и Al_2O_3) для увеличения диаметра сердцевины и сохранения близкого к одномодовому режима распространения излучения на длине волны 1550 нм. Увеличенная сердцевина способствует уменьшению потерь на сварку со стандартными ВС. ППП, профили легирования и профиль акустического показателя преломления измеренные В заготовке И рассчитанные для итогового ВС представлены на рисунке 57 а)-в). Затем, заготовка была сполирована для получения смещённой на 37,5 мкм относительно оси ВС сердцевины при внешнем диаметре 125 мкм. Сердцевина ВС имела диаметр 7,5 мкм. Измеренная длина волны отсечки первой высшей моды составила 1650 нм, что, при условии сильного изгиба сердцевины, приводит к одномодовому режиму распространения излучения на длине волны 1550 мкм. Рассчитанный диаметр поля моды на длине волны 1550 мкм 134

составил 7,96 мкм. Аналогично предыдущему параграфу на ВС наносилось дополнительное герметичное углеродное покрытие для увеличения прочности ВС.

Для оценки подавления ВРМБ за счёт изменения акустического профиля было произведено измерение спектра ВРМБ методом, описанным в предыдущем параграфе слабо изогнутого ВС со смещённой сердцевиной, намотанного на катушку диаметром 180 мм. Для сравнения был взят стандартный телекоммуникационный ВС SMF-28 с немного большим диаметром поля моды (10,8 мкм). Результаты измерений приведены на рисунке 58. Как видно, в спектре ВРМБ ВС со смещённой сердцевиной присутствует 4 пика, а максимальный g_B составляет 3,6 м/Вт*10⁻¹². Это более чем в 4 раза (6,5 дБ) меньше максимального g_B для SMF-28. Минимальное расстояние (между правыми пиками) составило 196 МГц, а максимальное – 309 МГц.

После этого ВС со смещённой сердцевиной был поочередно намотан на алюминиевые цилиндры уменьшающегося диаметра. Диаметры намотки (D_{kar}) и соответствующая им деформация (ε_c) сердцевины представлены в таблице б. Используя измеренные спектры ВРМБ (см. рис. 59) было рассчитано уширение левого пика для каждого диаметра. Так как уширение для диаметра намотки 28 мм оказалось меньше максимального расстояния между пиками можно заметить, что уширение не является равномерным, как и в прошлом параграфе. Это обусловлено тем, что большая часть ВС находится в одном из трёх положений: 1 – сердцевина расположена близко к катушке (максимальное сжатие), 2 – сердцевина расположена далеко от катушки (максимальное растяжение) и 3 – сердцевина находится на том же расстоянии от катушки, что и ось ВС (ноль деформации). Доля ВС в промежуточных положениях оказалась значительно меньше.



Рисунок 57.а) ППП; б) Профили легирования; в) Рассчитанный профиль акустического показателя преломления; г) фотография торца ВС, описанного в параграфе.

Неравномерное уширение спектра ВРМБ привело к тому, что максимальное подавление ВРМБ было получено при максимальном уширении, превышающем минимальное расстояние между пиками – при диаметре намотки 15 мм. При этом пик усиления ВРМБ уменьшился с 3,6 до 1,2 м/Вт*10⁻¹². Таким образом дополнительные 4,8 дБ подавления ВРМБ приводят к суммарному подавлению равному 11,3 дБ.

Для подтверждения величины подавления ВРМБ было произведено прямое измерение порога методом, описанным в параграфе 4.2.2. Было

использовано 40 м ВС со смещённой сердцевиной, намотанного на катушку с диаметром 15 мм и 40 м SMF-28. Пороги составили 18,9 Вт и 3 Вт соответственно. Беря в расчёт разницу в диаметрах полей мод, это означает, что порог ВРМБ повышен на 10,5 дБ по сравнению с SMF-28.



Рисунок 58. Измеренный спектр ВРМБ для ВС со смещённой сердцевиной с диаметром изгиба 180 мм и SMF-28.

Таблица 6. Параметры ВС со смещённой сердцевиной в зависимости от диаметра намотки. а) ε_c – суммарная деформация сердцевины, равная удвоенной деформации сжатия или растяжения. б) сумма отрицательного и положительного сдвигов, рассчитанных из измерений спектра ВРМБ.

D _{кат} , мм	$\varepsilon_{c}^{a)},\%$	ΔF_{SBS}^{δ} , МГц
180	0.08	
28	0.53	170
15	0.99	315
10	1.47	570



Рисунок 59. Измеренные спектры ВРМБ ВС со смещённой сердцевиной для разных диаметров намотки.

Для подтверждения величины подавления ВРМБ было произведено прямое измерение порога методом, описанным в параграфе 4.2.2. Было использовано 40 м ВС со смещённой сердцевиной, намотанного на катушку с диаметром 15 мм и 40 м SMF-28. Пороги составили 18,9 Вт и 3 Вт соответственно. Беря в расчёт разницу в диаметрах полей мод, это означает, что порог ВРМБ повышен на 10,5 дБ по сравнению с SMF-28.

Важно отметить, что достигнутое подавление ВРМБ не является максимальным при использовании данного метода. Так, увеличение добавок концентрации легирующих до уровня параграфа 4.2.1 С соответственным уменьшением диаметра сердцевины должно привести к увеличению расстояния между крайними пиками до более чем 1 ГГц. Это максимальное уширение, получаемое счёт смещённой увеличит за сердцевины. Кроме того, меньший диаметр сердцевины полезен при использовании такого BC в усилителях, основанных на вынужденном комбинационном рассеянии.

4.4. Выводы

Проведено исследование спектров ВРМБ в различных ВС, обладающих как волноводной, так и антиволноводной акустической структурой. Показано, что использование акустически волноводной структуры сердцевины с неравномерным легированием по радиусу световода обеспечивает максимальное подавление ВРМБ (продемонстрировано подавление на уровне 6.4 дБ). Кроме того, такой подход так же применим к световодам с большим полем моды, где продемонстрировано подавление на уровне 4.8 дБ по сравнению с германосиликатным ВС, равномерно легированным по радиусу и имеющим такие же оптические характеристики (апертуру сердцевины, отсечку и площадь поля моды).

Предложена новая конструкция ВС для подавления ВРМБ со смещённой относительно оси волокна сердцевиной. Подавление ВРМБ в этом случае достигается путем намотки световода на катушку малого диаметра. Вращение ВС при намотке приводит к появлению вариаций растяжения и сжатия сердцевины при различных ориентациях поперечного сечения световода относительно катушки. Для германосиликатного ВС, намотанного на катушку диаметром 28 мм, было продемонстрировано подавление ВРМБ на 4,1 дБ относительно ВС, сердцевина которого не испытывает натяжений и сжатий.

Впервые показана возможность комбинации двух принципиально разных подходов к подавлению усиления ВРМБ – локального уширения спектра за счет формирования неоднородной по радиусу акустической волноводной структуры и вариаций деформации сердцевины по длине ВС. В частности, продемонстрировано подавление ВРМБ на 10.5 дБ, обеспеченное формированием четырех отдельно расположенных пиков усиления ВРМБ за

139

счет подбора состава сердцевины и уширение этих пиков путем намотки BC со смещенной сердцевиной на катушку диаметром 15 мм.

Заключение

- 1. Впервые проведено детальное исследование влияния состава стеклянной матрицы сердцевины и длины волны излучения накачки на эффективность преобразования излучения накачки в сигнал и порог нелинейных эффектов в ЭВС с двойной отражающей оболочкой. Установлено, излучения С-диапазоне что для усиления В предпочтительным является использование АФС ВС при накачке на длине волны 981 нм, а для L диапазона – использование ФГАС ВС, накачиваемого на длине волны 976 нм. Выбор оптимальных параметров усилителя позволил продемонстрировать рекордно высокую пиковую мощность на выходе ЭВУ - 84 кВт при длительности импульса 2 нс. Впервые реализован усилитель в схеме с накачкой по оболочке, составленный из двух соединенных последовательно ЭВС разного состава (АФС и ФГАС), в котором показана возможность повышения порога ВРМБ как минимум в полтора раза (относительно ЭВУ, ЭВС) при сохранении основанного на одном эффективности преобразования излучения накачки в сигнал.
- 2. Экспериментально исследованы пути достижения предельно высоких значений эффективности и пиковой мощности в ЭВУ с накачкой по оболочке. В частности, за счет создания ЭВС с увеличенным вплоть до 0.76 отношением диаметра сердцевины к диаметру оболочки была получена рекордно высокая (среди ЭВС, не содержащих иттербий и накачиваемых по оболочке) эффективность преобразования излучения накачки в сигнал, равная 48.7%. Так же, впервые продемонстрирована возможность достижения в ЭВУ, работающих в одномодовом режиме, рекордно высокого порога нелинейных эффектов (более 20 кВт для спектрально-ограниченных импульсов длительностью около 55 нс). Данный результат достигнут благодаря разработке и применению на финальном каскаде усилителя конусного ЭВС с рекордно большим

диаметром поля фундаментальной моды, равным 53,4 мкм, при этом качество пучка выходного излучения было близко к дифракционно ограниченному (параметр $M^2 = 1,26$).

- 3. Проведено систематическое исследование ЭИВС с большим диаметром поля моды. В частности, впервые была разработан и исследована конструкция одномодового для спектральной области около 1,55 мкм ЭИВС с увеличенным до 18 мкм диаметром поля моды. Излучение на выходе реализованного ЭИВС оставалось дифракционно ограниченным $(M^2 < 1,1)$ независимо от мощности сигнала на выходе BC, в то время как в лазерах на основе предложенных ранее конструкций ЭИВС с увеличенным диаметром поля моды качество пучка выходного излучения падает с ростом выходной мощности. Для повышения порога нелинейных эффектов в полностью волоконном ЭВУ впервые реализована конструкция комбинированного ЭВУ, состоящего из отрезка ЭВС и ЭИВС. При достижении близкой к предельной пиковой мощности (3,7 кВт) применение такого подхода позволило обеспечить рекордно высокую эффективность преобразования излучения накачки в сигнал, равную 23,6%,
- 4. В пассивных ВС предложен новый метод подавления ВРМБ, основанный на создании многомодового акустического профиля. Применение данного подхода позволило добиться подавление ВРМБ на уровне не менее 6,4 дБ для ВС с увеличенной числовой апертурой сердцевины (NA=0,24) и не менее 4,8 дБ для ВС с уменьшенной (NA=0,075). Показана возможность дальнейшего увеличения до 10,5 дБ порога ВРМБ в ВС с большой числовой апертурой (NA=0,17) за счет комбинации локального уширения спектра ВРМБ (путем создания многомодового акустического профиля) и дополнительного уширения по длине ВС за счёт вариации натяжения и сжатия сердцевины.

Список литературы

1 Jelínková H., Pašta J., Šulc J., Němec M., Koranda P. Anterior eye tissue transmission for the radiation with the wavelength from eye safe region // Laser Phys. Lett. 2005a. T. 2. № 12. C. 603–607.

2 Pichugina Y. L., Banta R. M., Brewer W. A., Sandberg S. P., Hardesty R. M. Doppler Lidar–Based Wind-Profile Measurement System for Offshore Wind-Energy and Other Marine Boundary Layer Applications // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2012b. T. 51. № 2. C. 327–349.

3 Kotov L. V., Töws A., Kurtz A., Bobkov K. K., Aleshkina S. S., Bubnov M. M., Lipatov D. S., Guryanov A. N., Likhachev M. Monolithic high peak-power coherent Doppler lidar system // Proc. SPIE / под ред. J. Ballato., 2016с. С. 97282U.

4 Dobler J. T., Braun M., Nagel J., Temyanko V. L., Zaccheo T. S., Harrison F. W., Browell E. V., Kooi S. A. Applications of fiber lasers for remote sensing of atmospheric greenhouse gases // Fiber Lasers X Technol. Syst. Appl. 2013d. T. 8601. C. 86011Q.

5 Yu A. W., Abshire J. B., Storm M., Betin A. Laser amplifier development for the remote sensing of CO2 from space // Proc. SPIE. , 2015e. C. 93420M.

6 Becker P. C., Olsson N. A., Simpson J. R. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology. San Diego: Academic Press, 1999f.

7 Wysocki P. F., Wagener J. L., Digonnet M. J. F., Shaw H. J. Evidence and modeling of paired ions and other loss mechanisms in erbium-doped silica fibers // Proc. SPIE. 1993g. T. 1789. № March 1993. C. 66.

8 Myslinski P., Nguyen D., Chrostowski J. Effects of concentration on the performance of erbium-doped fiber amplifiers // J. Light. Technol. 1997h. T. 15. № 1. C. 112–120.

9 Arai K., Namikawa H., Kumata K., Honda T., Ishii Y., Handa T. Aluminum or phosphorus co-doping effects on the fluorescence and structural properties of neodymium-doped silica glass // J. Appl. Phys. 1986i. T. 59. № 10. C. 3430–3436.

10 Myslinski P., Fraser J., Chrostowski J. Nanosecond Kinetics of Upconversion Process in EDF and its Effect on EDFA Performance // Proc. Optical Amplifiers and Their Applications. Washington, D.C.: OSA, 1995j. C. ThE3.

11 Плоцкий А. Ю., Курков А. С., Яшков М. Ю., Бубнов М. М., Лихачев М. Е., Сысолятин А. А., Гурьянов А. Н., Дианов Е. М. Усилительные свойства активных световодов с высокой концентрацией ионов эрбия // Квантовая электроника. 2005k. Т. 35. № 6. С. 559–562.

12 Likhachev M. E., Bubnov M. M., Zotov K. V., Lipatov D. S., Yashkov M. V., Guryanov A. N. Effect of the AlPO4 join on the pump-to-signal conversion efficiency in heavily Er-doped fibers // Opt. Lett. 20091. T. 34. № 21. C. 3355.

13 Tarbox E. J., Grasso G., Payne D. N. High-Power Erbium-Doped-Fiber Amplifiers Operating in the Saturated Regime // IEEE Photonics Technol. Lett. 1991m. T. 3. № 3. C. 253–255.

14 Miniscalco W. J. Erbium-Doped Glasses for Fiber Amplifiers at 1500 nm // J. Light. Technol. 1991n. T. 9. № 2. C. 234–250.

15 Wagener J. L., Digonnet M. J. F., Wysocki P. F., Shaw H. J. Effect of composition on clustering in Er-doped fiber lasers // Proc.SPIE. 1994o. T. 2073. C. 14.

16 Kotov L. V., Likhachev M. E., Bubnov M. M., Medvedkov O. I., Yashkov M. V., Guryanov A. N., Lhermite J., Février S., Cormier E. 75 W 40% efficiency single-mode all-fiber erbium-doped laser cladding pumped at 976 nm // Opt. Lett. 2013p. T. 38. № 13. C. 2230.

17 Kosinski S. G., Krol D. M., Duncan T. M., Douglas D. C., MacChesney J. 144
B., Simpson J. R. Raman and NMR spectroscopy of SiO2 glasses CO-doped with Al2O3 and P2O5 // J. Non. Cryst. Solids. 1988q. T. 105. № 1–2. C. 45–52.

18 Kotov L., Likhachev M., Bubnov M., Medvedkov O., Lipatov D., Guryanov A., Zaytsev K., Jossent M., Février S. Millijoule pulse energy 100nanosecond Er-doped fiber laser // Opt. Lett. 2015r. T. 40. № 7. C. 1189.

19 Kotov L. V, Likhachev M. E., Bubnov M. M., Paramonov V. M., Belovolov M. I., Lipatov D. S., Guryanov A. N. Record peak power singlefrequency erbium-doped fiber amplifiers // Proc. SPIE 9344, Fiber Lasers XII: Technology, Systems, and Applications / под ред. L. B. Shaw. : SPIE, 2015s. C. 934408.

20 Shi W., Petersen E. B., Yao Z., Nguyen D. T., Zong J., Stephen M. A., Chavez-Pirson A., Peyghambarian N. Kilowatt-level stimulated-Brillouin-scattering-threshold monolithic transform-limited 100 ns pulsed fiber laser at 1530 nm // Opt. Lett. 2010t. T. 35. № 14. C. 2418.

21 Petersen E., Shi W., Chavez-Pirson A., Peyghambarian N. High peakpower single-frequency pulses using multiple stage, large core phosphate fibers and preshaped pulses // Appl. Opt. 2012u. T. 51. № 5. C. 531.

22 Kiritchenko N. V., Kotov L. V., Melkumov M. A., Likhachev M. E., Bubnov M. M., Yashkov M. V., Laptev A. Y., Guryanov A. N. Effect of ytterbium co-doping on erbium clustering in silica-doped glass // Laser Phys. 2015v. T. 25. № 2. C. 4–9.

23 Laroche M., Girard S., Sahu J. K., Clarkson W. A., Nilsson J. Accurate efficiency evaluation of energy-transfer processes in phosphosilicate Er^3+-Yb^3+- codoped fibers // J. Opt. Soc. Am. B. 2006w. T. 23. № 2. C. 195.

24 Várallyay Z., Jasapara J. C. Comparison of amplification in large area fibers using cladding-pump and fundamental-mode core-pump schemes // Opt.

Express. 2009x. T. 17. № 20. C. 17242.

25 Matniyaz T., Kong F., Kalichevsky-Dong M. T., Dong L. 302 W singlemode power from an Er/Yb fiber MOPA // Opt. Lett. 2020y. T. 45. № 10. C. 2910.

26 Lee W., Geng J., Jiang S., Yu A. W. 1.8 mJ, 3.5 kW single-frequency optical pulses at 1572 nm generated from an all-fiber MOPA system // Opt. Lett. 2018z. T. 43. № 10. C. 2264.

27 Dong L., Matniyaz T., Kalichevsky-Dong M. T., Nilsson J., Jeong Y. Modeling Er/Yb fiber lasers at high powers // Opt. Express. 2020aa. T. 28. № 11. C. 16244.

28 Han Q., Ning J., Sheng Z. Numerical investigation of the ASE and power scaling of cladding-pumped Er-Yb codoped fiber amplifiers // IEEE J. Quantum Electron. 2010ab. T. 46. № 11. C. 1535–1541.

29 Jeong Y., Sahu J. K., Soh D. B. S., Codemard C. A., Nilsson J. High-power tunable single-frequency single-mode erbium:ytterbium codoped large-core fiber master-oscillator power amplifier source // Opt. Lett. 2005ac. T. 30. № 22. C. 2997.

30 Zhao Z., Xuan H., Igarashi H., Ito S., Kakizaki K., Kobayashi Y. Single frequency, 5 ns, 200 µJ, 1553 nm fiber laser using silica based Er-doped fiber // Opt. Express. 2015ad. T. 23. № 23. C. 29764.

31 Kotov L. V, Likhachev M. E., Bubnov M. M., Paramonov V. M., Belovolov M. I., Lipatov D. S., Guryanov A. N. Record-peak-power all-fiber single-frequency 1550 nm laser // Laser Phys. Lett. 2014ae. T. 11. № 9. C. 095102.

32 Kotov L. V., Bubnov M. M., Lipatov D. S., Guryanov A. N., Février S., Lhermite J., Cormier E., Koptev M. Y., Anashkina E. A., Muraviev S. V., Andrianov A. V., Kim A. V., Likhachev M. E. Double-clad large mode area Er-doped fiber for high-energy and high-peak power amplifiers // Fiber Lasers XI Technol. Syst. Appl. 2014af. T. 8961. № March 2014. C. 89611L. 33 Kotov L., Likhachev M., Bubnov M., Lipatov D., Guryanov A. Record efficiency kW-level peak power single-frequency er-doped fiber amplifier // CLEO Europe. , 2015ag. C. CJ_P_48.

34 Supradeepa V. R., Nicholson J. W. Power scaling of high-efficiency 1.5 μm cascaded Raman fiber lasers // Opt. Lett. 2013ah. T. 38. № 14. C. 2538.

35 Jasapara J. C., Andrejco M. J., Desantolo A., Yablon A. D., Várallyay Z., Nicholson J. W., Fini J. M., Digiovanni D. J., Headley C., Monberg E., Dimarcello F. V. Diffraction-limited fundamental mode operation of core-pumped very-large-mode-area Er fiber amplifiers // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2009ai. T. 15. № 1. C. 3–11.

36 Supradeepa V. R., Nicholson J. W., Feder K. Continuous wave erbiumdoped fiber laser with output power of >100 W at 1550 nm in-band core-pumped by a 1480nm Raman fiber laser // CLEO. : IEEE, 2012aj. C. 1–2.

37 Nicholson J. W., DeSantolo A., Yan M. F., Wisk P., Mangan B., Puc G., Yu A. W., Stephen M. A. High energy, 1572.3 nm pulses for CO2 LIDAR from a polarization-maintaining, very-large-mode-area, Er-doped fiber amplifier // Opt. Express. 2016ak. T. 24. № 17. C. 19961.

38 Lim E.-L., Alam S., Richardson D. J. Optimizing the pumping configuration for the power scaling of in-band pumped erbium doped fiber amplifiers // Opt. Express. 2012al. T. 20. № 13. C. 13886.

39 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. 2014am. T. 39. № 13. C. 3974.

40 Zhang J., Fromzel V., Dubinskii M. Resonantly cladding-pumped Yb-free Er-doped LMA fiber laser with record high power and efficiency // Opt. Express. 2011an. T. 19. № 6. C. 5574.

41 Aleshkina S. S., Levchenko A. E., Medvedkov O. I., Bobkov K. K., Bubnov M. M., Lipatov D. S., Guryanov A. N., Likhachev M. E. Photodarkeningfree Yb-doped saddle-shaped fiber for high power single-mode 976-nm laser // IEEE Photonics Technol. Lett. 2018ao. T. 30. № 1. C. 127–130.

42 Kotov L., Temyanko V., Aleshkina S., Bubnov M., Lipatov D., Likhachev M. Efficient single-mode 976 nm amplifier based on a 45 micron outer diameter Ybdoped fiber // Opt. Lett. 2020ap. T. 45. № 15. C. 4292.

43 Roeser F., Jauregui C., Limpert J., Tünnermann A. 94 W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser // Opt. Express. 2008aq. T. 16. № 22. C. 17310.

44 Kaczmarek P., Stachowiak D., Abramski K. 40 W All-Fiber Er/Yb MOPA System Using Self-Fabricated High-Power Passive Fiber Components // Appl. Sci. 2018ar. T. 8. № 6. C. 869.

45 Bai X., Sheng Q., Zhang H., Fu S., Shi W., Yao J., Xiaolei Bai, Quan Sheng, Haiwei Zhang, Shijie Fu, Wei Shi, Jianquan Yao. High-Power All-Fiber Single-Frequency Erbium–Ytterbium Co-Doped Fiber Master Oscillator Power Amplifier // IEEE Photonics J. 2015as. T. 7. № 6. C. 1–6.

46 Zhang X., Diao W., Liu Y., Liu J., Hou X., Chen W. Single-frequency polarized eye-safe all-fiber laser with peak power over kilowatt // Appl. Phys. B. 2014at. T. 115. № 1. C. 123–127.

47 Renard W., Robin T., Cadier B., Gouët J. Le, Lombard L., Durecu A., Bourdon P., Canat G. High Peak Power Single-Frequency Efficient Erbium-Ytterbium Doped LMA Fiber // CLEO: 2015. Washington, D.C.: OSA, 2015au. C. STh4L.6.

48 Varona O. De, Fittkau W., Booker P., Theeg T., Steinke M., Kracht D., Neumann J., Wessels P. Single-frequency fiber amplifier at 15 μ m with 100 W in the linearly-polarized TEM_00 mode for next-generation gravitational wave detectors // Opt. Express. 2017av. T. 25. No 21. C. 24880.

49 Creeden D., Pretorius H., Limongelli J., Setzler S. D. Single frequency 1560nm Er:Yb fiber amplifier with 207W output power and 50.5% slope efficiency // Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications / под ред. J. Ballato. : SPIE, 2016aw. C. 97282L.

50 Dilley C. E., Stephen M. A., Savage-Leuchs M. P. High SBS-threshold, narrowband, erbium codoped with ytterbium fiber amplifier pulses frequencydoubled to 770 nm // Opt. Express. 2007ax. T. 15. № 22. C. 14389.

51 Alegria C., Jeong Y., Codemard C., Sahu J. K. K., Alvarez-Chavez J. A. A., Fu L., Ibsen M., Nilsson J. 83-W Single-Frequency Narrow-Linewidth MOPA Using Large-Core Erbium–Ytterbium Co-Doped Fiber // IEEE Photonics Technol. Lett. 2004ay. T. 16. № 8. C. 1825–1827.

52 Jebali M. A., Maran J. N., LaRochelle S., Chatigny S., Lapointe M. A., Gagnon E. A 103W high efficiency in-band cladding-pumped 1593 nm all-fiber erbium-doped fiber laser // CLEO. , 2012az. C. JTh1I.3.

53 Boyd R. W. Nonlinear Optics. : Academic Press, 2008ba. 620 c.

54 Tang C. L. Saturation and spectral characteristics of the Stokes emission in the stimulated Brillouin process // J. Appl. Phys. 1966bb. T. 37. № 8. C. 2945–2955.

55 Lichtman E., Friesem A. A. Stimulated Brillouin scattering excited by a multimode laser in single-mode optical fibers // Opt. Commun. 1987bc. T. 64. № 6. C. 544–548.

56 AGRAWAL G. P. Nonlinear fiber optics. : Academic Press, 2001bd. 481 c.

57 Deventer M. O. van, Boot A. J. Polarization Properties of Stimulated Brillouin Scattering in Single-Mode Fibers // J. Light. Technol. 1994be. T. 12. № 4.

C. 585-590.

58 Takahashi M., Tadakuma M., Hiroishi J., Yagi T. 5.7 dB SBS suppression with a HNLF (module) comprised of 3 HNLFs having different GeO // 33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication - ECOC 2007. : IEE, 2007bf. C. P014–P014.

59 Shiraki K., Ohashi M., Tateda M. SBS threshold of a fiber with a brillouin frequency shift distribution // J. Light. Technol. 1996bg. T. 14. № 1. C. 50–57.

60 Nagel J., Temyanko V., Dobler J., Salganskii M., Likhachev M., Alexeev V., Bubnov M., Dianov E., Norwood R., Peyghambarian N. Phosphosilicate Raman gain fibers with varying core concentration for enhanced SBS suppression // IPC 2013. 2013bh. T. 2. C. 271–272.

61 Evert A., James A., Hawkins T., Foy P., Stolen R., Dragic P., Dong L., Rice R., Ballato J. Longitudinally-graded optical fibers // Opt. Express. 2012bi. T. 20. № 16. C. 17393.

62 Hansryd J., Dross F., Westlund M., Andrekson P. A., Knudsen S. N. Increase of the SBS threshold in a short highly nonlinear fiber by applying a temperature distribution // J. Light. Technol. 2001bj. T. 19. № 11. C. 1691–1697.

63 Kovalev V. I., Harrison R. G. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high-power single-frequency fiber amplifiers // Opt. Lett. 2006bk. T. 31. № 2. C. 161.

64 Jeong Y., Nilsson J., Sahu J. K., Payne D. N., Horley R., Hickey L. M. B., Turner P. W. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber masteroscillator power-amplifier sources up to 500 W // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2007bl. T. 13. № 3. C. 546–550.

65 Yoshizawa N., Imai T. Stimulated Brillouin scattering suppression by means of applying strain distribution to fiber with cabling // J. Light. Technol.

1993bm. T. 11. № 10. C. 1518–1522.

66 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. 2005bn. T. 23. № 11. C. 3808–3814.

67 Rothenberg J. E., Thielen P. A., Wickham M., Asman C. P. Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency multi-kilowatt fiber amplifiers // Proc. SPIE / под ред. J. Broeng, C. Headley III. , 2008bo. C. 68730O.

68 Engelbrecht R. Analysis of SBS gain shaping and threshold increase by arbitrary strain distributions // J. Light. Technol. 2014bp. T. 32. № 9. C. 1689–1700.

69 Зельдович Б. Я., Пилипецкий А. Н. Влияние дифракции звука на ВРМБ в одномодовом световоде // Квантовая электроника. 1986bq. Т. 13. № 4. С. 840–843.

70 Shiraki K., Ohashi M., Tateda M. Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fibre by changing the core radius // Electron. Lett. 1995br. T. 31. № 8. C. 668.

71 Jen C.-K., Neron C., Shang A., Abe K., Bonnell L., Kushibiki J. Acoustic Characterization of Silica Glasses // J. Am. Ceram. Soc. 1993bs. T. 76. № 3. C. 712–716.

72 Зельдович Б. Я., Пилипецкий А. Н. Роль звуковода и антизвуковода при ВРМБ в одномодовом световоде // Квантовая электроника. 1988bt. Т. 15. № 6. С. 1297–1304.

73 Дианов Е. М., Карасик А. Я., Лучников А. В., Пилипецкий А. Н. Влияние поперечной гиперзвуковой неоднородности на спектр излучения ВРМБ в одномодовых волоконных световодах // Квантовая электроника. 1989bu. Т. 16. № 4. С. 752–756.

151

74 Nakanishi T., Tanaka M., Hasegawa T., Hirano M., Okuno T., Onishi M. Al2O3-SiO2 core highly nonlinear dispersion-shifted fiber with Brillouin gain suppression improved by 6.1 dB // ECOC. , 2006bv. C. Th4.2.2.

75 Mermelstein M. D. SBS threshold measurements and acoustic beam propagation modeling in guiding and anti-guiding single mode optical fibers // Opt. Express. 2009bw. T. 17. № 18. C. 16225.

76 Zou W., He Z., Hotate K. Experimental study of Brillouin scattering in fluorine-doped single-mode optical fibers // Opt Express. 2008bx. T. 16. № 23. C. 18804–18812.

77 Лихачев М. Е., Алексеев В. В., Бубнов М. М., Яшков М. В., Вечканов Н. Н., Гурьянов А. Н., Пейгамбариан Н., Темянко В., Нагел Д. Влияние длины волны накачки и размера сердцевины световодов с акустической антиволноводной структурой на спектры ВРМБ // Квантовая электроника. 2014by. Т. 44. № 11. С. 1043–1047.

78 Dragic P. D., Liu C.-H. L. C.-H., Papen G. C., Galvanauskas A. Optical fiber with an acoustic guiding layer for stimulated Brillouin scattering suppression // CLEO. , 2005bz. C. CThZ3.

79 Li M.-J., Chen X., Wang J., Gray S., Liu A., Demeritt J. A., Ruffin A. B., Crowley A. M., Walton D. T., Zenteno L. A. Al/Ge co-doped large mode area fiber with high SBS threshold // Opt. Express. 2007ca. T. 15. № 13. C. 8290.

80 Gray S., Walton D. T., Chen X., Wang J., Li M., Liu A., Ruffin A. B., Demeritt J. A., Zenteno L. A. Optical Fibers With Tailored Acoustic Speed Profiles for Suppressing Stimulated Brillouin Scattering in High-Power, Single-Frequency Sources // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2009cb. T. 15. № 1. C. 37–46.

81 Mermelstein M. D., Andrejco M. J., Fini J., Yablon A., Headley III C., DiGiovanni D. J., McCurdy A. H. 11.2 dB SBS gain suppression in a large mode area Yb-doped optical fiber // Proc. SPIE / под ред. J. Broeng, C. Headley III., 2008сс. С. 68730N.

82 Robin C., Dajani I., Pulford B., Vergien C. Single-frequency Yb-doped photonic crystal fiber amplifier with 800W output power // Proc. SPIE / под ред. S. Ramachandran. : SPIE, 2014cd. C. 896103.

83 Yashkov M. V, Abramov A. N., Gur'yanov A. N., Melkumov M. A., Shubin A. V, Bubnov M. M., Likhachev M. E. Optical properties of heavily ytterbium- and fluorine-doped aluminosilicate core fibres // Quantum Electron. 2017ce. T. 47. № 12. C. 1099–1104.

84 Likhachev M. E., Bubnov M. M., Zotov K. V, Medvedkov O. I., Lipatov D. S., Yashkov M. V, Gur'yanov A. N. Erbium-doped aluminophosphosilicate optical fibres // Quantum Electron. 2010cf. T. 40. № 7. C. 633–638.

85 Aleshkina S. S., Kochergina T. A., Bobkov K. K., Kotov L. V., Bubnov M. M., Park J., Likhachev M. E. High-power 125-μm-optical-fiber cladding light stripper // 2016 Conf. Lasers Electro-Optics, CLEO 2016. 2016cg. C. 5–6.

86 Gladyshev A. V. et al. 2.9, 3.3, and 3.5 μm Raman Lasers Based on Revolver Hollow-Core Silica Fiber Filled by 1H2/D2 Gas Mixture // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2018ch. T. 24. № 3. C. 1–8.

87 Nagel J. A., Temyanko V., Dobler J. T., Likhachev M. E., Bubnov M. M., Dianov E. M., Peyghambarian N. Cascaded gain fibers for increasing output power and the stimulated Brillouin scattering threshold of narrow linewidth fiber Raman amplifiers // Appl. Opt. 2016ci. T. 55. № 15. C. 4066.

88 Shen D. Y., Sahu J. K., Clarkson W. A. Highly efficient in-band pumped Er:YAG laser with 60 W of output at 1645 nm // Opt. Lett. 2006cj. T. 31. № 6. C. 754.

89 Chang N. W. H., Simakov N., Hosken D. J., Munch J., Ottaway D. J., 153

Veitch P. J. Resonantly diode-pumped continuous-wave and Q-switched Er:YAG laser at 1645 nm // Opt. Express. 2010ck. T. 18. № 13. C. 13673.

90 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. 2006cl. T. 14. № 13. C. 6084.

91 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. Washington, D.C.: OSA, 2019cm. C. JTh3A.6.

92 Jung Y., Yoonchan Jeong, Brambilla G., Richardson D. J. Selective excitation of the fundamental mode in a multimode fiber using an adiabatically tapered splice // 2009 14th OptoElectronics and Communications Conference. : IEEE, 2009cn. C. 1–2.

93 Bogatyrev V. A., Bubnov M. M., Dianov E. M., Kurkov A. S., Mamyshev P. V., Prokhorov A. M., Rumyantsev S. D., Semenov V. A., Semenov S. L., Sysoliatin A. A., Chernikov S. V., Gur'yanov A. N., Devyatykh G. G., Miroshnichenko S. I. A Single-Mode Fiber with Chromatic Dispersion Varying Along the Length // J. Light. Technol. 1991co. T. 9. № 5. C. 561–566.

94 Bogatyrjov V. A., Sysoliatin A. A. An efficient method to produce fibers with outer diameter varying along the length // Fiber Opt. Sens. Technol. Ii. 2001cp. T. 4204. C. 274–277.

95 Vienne G. G., Brocklesby W. S., Brown R. S., Chen Z. J., Minelly J. D., Roman J. E., Payne D. N. Role of aluminum in ytterbium-erbium codoped phosphoaluminosilicate optical fibers // Opt. Fiber Technol. 1996cq. T. 2. № 4. C. 387–393.

96 Melkumov M. A., Laptev A. Y., Yashkov M. V., Vechkanov N. N., Guryanov A. N., Bufetov I. A. Effects of Yb3+ and Er3+ concentrations and doping procedure on excitation transfer efficiency in Er-Yb doped phosphosilicate fibers // Inorg. Mater. 2010cr. T. 46. № 3. C. 299–303.

97 Baier T., Dupeux G., Herbert S., Hardt S., Quere D. Triple-clad rare-earth doped optical fiber and applications // 2005cs.

98 Tankala K., Samson B., Carter A., Farroni J., Machewirth D., Jacobson N., Manyam U., Sanchez A., Chen M.-Y., Galvanauskas A., Torruellas W., Chen Y. New developments in high power eye-safe LMA fibers // Fiber Lasers III Technol. Syst. Appl. 2006ct. T. 6102. № February 2006. C. 610206.

99 Canat G., Jetschke S., Unger S., Lombard L., Bourdon P., Kirchhof J., Jolivet V., Dolfi A., Vasseur O. Multifilament-core fibers for high energy pulse amplification at 15 μ m with excellent beam quality // Opt. Lett. 2008cu. T. 33. No 22. C. 2701.

100 Bubnov M. M., Dianov E. M., Egorova O. N., Semjonov S. L., Guryanov A. N., Khopin V. F., DeLiso E. M. Fabrication and investigation of single-mode highly phosphorus-doped fibers for Raman lasers // Adv. Fiber Opt. 2000cv. T. 4083. № May 2000. C. 12.

101 Kawakami S., Nishida S. Characteristics of a doubly clad optical fiber with a low-index inner cladding // IEEE J. Quantum Electron. 1974cw. T. 10. № 12. C. 879–887.

102 Bobkov K., Andrianov A., Koptev M., Muravyev S., Levchenko A., Velmiskin V., Aleshkina S., Semjonov S., Lipatov D., Guryanov Al., Kim A., Likhachev M. Sub-MW peak power diffraction-limited chirped-pulse monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier // Opt. Express. 2017cx. T. 25. № 22. C. 26958– 26972.

103 Sefler G. A., Mack W. D., Valley G. C., Rose T. S. Secondary energy transfer and nonparticipatory Yb³⁺ ions in Er³⁺⁻Yb³⁺ high-power amplifier

fibers // J. Opt. Soc. Am. B. 2004cy. T. 21. No 10. C. 1740.

104 Koyamada Y., Sato S., Nakamura S., Sotobayashi H., Chujo W. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers // J. Light. Technol. 2004cz. T. 22. № 2. C. 631–639.

105 Smith R. G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering // Appl. Opt. 1972da. T. 11. № 11. C. 2489–2494.

106 Bogatyrjov V. A., Bubnov M. M., Dianov E. M., Rumjantsev S. D., Semjonov S. L. Mechanical reliability of polymer-coated and hermetically coated optical fibers based on proof testing // Opt. Eng. 1991db. T. 30. № 6. C. 690.