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

На правах рукописи

Levy t-

Вахрушев Александр Станиславович

## ВИСМУТОВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ СО СЛОЖНЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ

Специальность: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

#### ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

> Научный руководитель: Фирстов Сергей Владимирович доктор физико-математических наук

### Оглавление

Введе	ние4
Глава	1 Висмутовые световоды как активные среды для оптических устройств
ближн	его ИК-диапазона (Обзор опубликованных работ)
1.1.	Процессы изготовления висмутовых световодов и их особенности 17
1.2.	Общие характеристики ВАЦ: типы, диаграмма энергетических уровней,
полосі	ы поглощения и люминесценции
1.3.	Лазерные и усилительные свойства висмутовых световодов
1.4.	Выводы к Главе и постановка задач исследования
Глава	2 Описание экспериментальных установок и использованных методов
исслед	ования43
2.1.	Описание технологии получения преформ и световодов, легированных
висму	гом, с различным профилем показателя преломления и легирования 43
2.2.	Методы исследования абсорбционных и люминесцентных свойств
висму	говых световодов
2.3.	Схема измерения усилительных свойств световодов
2.4.	Конфигурации волоконно-оптических устройств (лазер, усилитель):
основі	ные принципы построения, особенности50
Глава	3 Висмутовые GeO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> световоды W- и G-дизайна для E+S-диапазона
(1360 -	– 1530 нм)
3.1.	Профиль показателя преломления, радиальное распределение Ві,
висму	говых активных центров в исследуемых образцах54
3.2.	Оптические свойства световодов. Коэффициент конверсии Bi—BAЦ 59
3.3.	Оптическое усиление висмутовых световодов. Лазерные эксперименты с
одном	одовой накачкой 67
3.4.	Выводы к Главе

Глава	4 Висмутовые $P_2O_5$ – $SiO_2$ световоды для О-диапазона (1260 – 1360 нм) с
депре	ссированной оболочкой (W-дизайн) и пьедесталом77
4.1.	Оптические свойства висмутовых $P_2O_5$ — $SiO_2$ световодов: с пьедесталом и
W-диз	зайном77
4.2.	Фото- и термоиндуцированные эффекты
4.3.	Лазеры и усилители на основе разработанных световодов
4.4.	Выводы к Главе
Глава	5 Висмутовые волоконные лазеры и оптические усилители с многомодовой
накач	кой
5.1.	Принцип работы: схема энергетических уровней ВАЦ и оптических
перех	одов
5.2.	Висмутовые волоконные лазеры с многомодовой диодной накачкой 106
5.3.	Влияние геометрии (формы и размера) световедущей оболочки на
эффен	стивность висмутовых лазеров с многомодовой накачкой110
5.4.	Эффект насыщения выходной мощности висмутовых лазеров с накачкой по
оболо	чке: причина, моделирование, эксперимент
5.5.	Висмутовые волоконные усилители для О-(1260 – 1360 нм), Е-(1360 –
1460 і	нм), S-(1460 – 1530 нм) диапазонов с многомодовой накачкой 125
5.6.	Выводы к Главе
Заклю	очение
Списс	ок используемых сокращений136
Списо	ок литературы137

#### Введение

#### Актуальность темы

В современном мире волоконно-оптические системы связи с высокой пропускной способностью играют важную роль в жизни людей, позволяя осуществлять передачу данных (электронная почта, мессенджеры и др.), получать доступ к широкому ряду онлайн-сервисов, в частности, к стриминговым онлайн платформам с возможностью просмотра/трансляций с высоким разрешением (FullHD, 4K), использованию "умных вещей" (IoT), "облачным" хранилищам и файлообменникам (cloud services), искусственному интеллекту (AI), электронным терминалам оплаты (e-commerce). Все это стало возможным благодаря тому, что на сегодняшний день уже проложено более миллиона километров волоконнооптического кабеля по дну океана, обеспечивая более 95% международного (межконтинентального) объема трафика. Несмотря на это тенденция по развёртыванию новых оптико-волоконных систем не просто сохраняется, но даже ускоряется, что обусловлено рядом факторов, связанных с повышением требований к качеству сетей из-за бурного использования онлайн-сервисов (особенно в пандемию covid), развертыванием сетей нового поколения 5G и 6G, возведением новых центров обработки данных и облачных хранилищ. Это приводит к постепенному увеличению глобального информационного трафика, который растет даже быстрее, чем прогнозировалось [1]. При предполагаемом росте сетевого трафика на 25 процентов в годовом исчислении ожидается, что передача информации по одному одномодовому световоду будет удваиваться каждые три года. Таким образом, при таких темпах в течение следующих примерно 20 лет трафик данных может увеличиться более чем в 100 раз, что необратимо приведет к информационному "коллапсу" (capacity crunch). В этой связи стали проводиться интенсивные исследования по поиску новых технологических решений по модернизации телекоммуникационных систем, направленных на увеличение их пропускной способности. Решением данной проблемы (по увеличению производительности существующих телекоммуникационных систем)

является задействование новых спектральных областей, где может осуществляться передача данных также эффективно, как и в области длин волн 1,53–1,61 мкм, т.е. по сути построения новой технологической платформы. Одним из ключевых элементов для такой платформы является волоконно-оптический усилитель, способный работать в О-, Е-, S- и U-телекоммуникационных диапазонах. Разработка активных сред является важным аспектом для построения таких усилителей. Больше 20 лет назад впервые были разработаны висмутовые световоды и продемонстрирована принципиальная возможность их использования для получения лазерного излучения и усиления оптических сигналов в областях длин волн 1,15-1,25 мкм [2, 3]. Интенсивный прогресс в данной области привел к появлению семейства висмутовых световодов для построения оптических усилителей для вышеуказанных спектральных диапазонов, которые потенциально могут быть интегрированы с эрбиевыми волоконно-оптическими усилителями [4]. Выполненные эксперименты показали, что висмутовые усилители [5, 6, 7, 8] по своим характеристикам превосходят существующих конкурентов (празеодимовые усилители [9, 10] и усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [11, 12, 13]), что усилило интерес к ним. Результатом этого стало появление первых коммерческих усилителей для О-диапазона, выпускаемых OFS (Furukawa Electric Co. Ltd) [14]. Преимущество О-диапазона состоит в том, что длина волны передатчика расположена вблизи длины волны нулевой дисперсии световодов, таким образом, ни оптической, ни электронной компенсации хроматической дисперсии в этом случае не требуется, способствуя низкой стоимости, приходящейся на один Мбайт передаваемой информации. Одно из применений такого типа оптических усилителей связано с их внедрением в Datacom технологии расширения возможностей ДЛЯ ИΧ И повышения производительности уже проложенных оптических систем высокоскоростной передачи данных, которые соединяют существующие центры обработки, анализа и хранения данных (Дата-Центры) с объектами существующей инфраструктуры. Дополнительным аргументом планов скорейшего внедрения данной технологии в зарубежных странах служит недавняя презентация одного из мировых лидеров по

производству полупроводниковой продукции Innolume Inc., который разработал диоды накачки для висмутовых усилителей и начинает их серийное производство. Интерес к технологиям, связанным с интеграцией висмутовых усилителей в системы оптической связи, постоянно растет, что, подтверждается научными публикациями и докладами на международных конференциях от разработчиков ведущих мировых компаний, как Huawei Tech., Nokia Bell Labs, Accelink Tech., SiFotonics Tech., China Mobile Communications Corp [15, 16, 17, 18]. Все вышеперечисленное определяет актуальность выбранной темы диссертации.

#### Степень разработанности темы

Тем не менее, единого мнения о потенциально достижимых параметрах висмутовых световодов до сих пор не существует, что связано с особенностями висмутовых активных сред, основной из которых является отсутствие достоверных знаний о физической природе висмутовых активных центров (ВАЦ), их специфике и особенностях процессов их формирования в стеклообразных материалах [19, 20, 21, 22, 23]. Несмотря на значительный прогресс в данном направлении, где были открыты различные явления, присущие ВАЦ, например, фотообесцвечивание, термически активированное формирование, требуется дальнейшее более глубокое изучение оптических свойств (стеклообразных) сред с ВАЦ, детальное исследование процессов формирования ВАЦ и спектроскопию лазерно-активных переходов.

Известно, что в висмутсодержащих средах концентрация ВАЦ заметно ниже общей концентрации висмута, а оптические свойства ВАЦ и иных форм висмутовых центров, которые могут образовываться помимо ВАЦ, в сильной степени зависят от структуры и химического состава используемой стеклянной матрицы [24, 25]. До настоящего времени изучение висмутовых световодов преимущественно было сосредоточено на исследовании стандартных дизайнов, т.е. световодов с равномерным распределением легирующих активных добавок (Ві) и неактивных примесей, используемых для формирования ступенчатого профиля показателя преломления (ППП) в сердцевине световода, где изучение ранее

упомянутых особенностей крайне затруднительно. В итоге это привело к тому, что к настоящему времени накоплен ряд нерешенных важных научных проблем, касающихся особенностей формирования (коэффициент конверсии, предельные концентрации и др.) и их свойств ВАЦ в различных областях сердцевины с неравномерным радиальным распределением легирующих добавок, особенно на границе сердцевина-оболочка, влияние приграничных областей с повышенным дефектообразованием на оптические свойства таких световодов, модифицирование химического состава стекла в приграничных областях на свойства висмутовых световодов, поиск оптимального радиального распределения концентраций легирующих примесей.

#### Цель и задачи диссертационной работы

диссертационной особенностей Целью работы изучение являлось формирования активных центров, а также их оптических свойств, в висмутовых фосфоросиликатных, германосиликатных световодах различного дизайна, включая структуры с неравномерным (градиентным) радиальным распределением легирующих добавок (далее будет обозначаться как G-дизайн), в том числе с ограниченным легированием, с депрессированной областью (слои с пониженным показателем преломления) вокруг сердцевины по сравнению с чисто кварцевым стеклом оболочки (далее, такие световоды, будут обозначаться как W-дизайн), структуры с пьедесталом. Кроме того, в данной работе рассмотрены возможности использования разработанных висмутовых световодов для создания оптических устройств улучшенными выходными характеристиками, В TOM числе реализованными с использованием оригинальных подходов.

Для достижения целей диссертационной работы были решены следующие **научные задачи**:

 Изучение особенностей формирования висмутовых активных центров в световедущих структурах с неравномерным радиальным распределением легирующих добавок, включая структуры с ограниченным легированием.

- Выполнение численных расчетов по определению коэффициента конверсии Ві—ВАЦ и его радиального распределения.
- Поиск оптимальных концентраций и профиля легирования висмутовых германосиликатных световодов с G-дизайном для достижения лазерных сред с улучшенными характеристиками.
- Подробное изучение оптических свойств висмутовых фосфоросиликатных световодов с пьедестальной структурой, а также W-дизайном с различной концентрацией оксида фосфора в сердцевине световода.
- Детальное исследование фото- и термоиндуцированных процессов в фосфоросиликатных световодах, легированных висмутом. Определение энергий активации и природы протекающих процессов, связанных с ВАЦ. Построение феноменологических моделей изучаемых процессов. Сравнительный анализ фото- и термоиндуцированных свойств световода с W-дизайном с аналогичными свойствами, характерными для стандартных световодов со ступенчатым профилем показателя преломления.
- Разработка волоконно-оптических устройств (лазеров, усилителей) на основе разработанных световодов при накачке одно- и многомодовыми источниками.
   Изучение особенностей работы таких устройств, получение зависимостей основных выходных характеристик.

#### Научная новизна работы

- Разработаны висмутовые волоконные световоды оригинального дизайна с различным распределением легирующих (активной и неактивной) добавок, обладающие улучшенными свойствами для получения лазеров с рекордной (среди висмутовых волоконных лазеров) эффективностью и широкополосных оптических усилителей.
- Установлены закономерности формирования ВАЦ в световодах с кольцевым, центральным легированием висмута (Ві) и квазиградиентным распределением оксида германия (неактивная добавка).

- Выявлены особенности протекания процесса фотообесцвечивания ВАЦ при воздействии лазерного излучения ИК и видимого диапазона в световодах W-дизайна с сердцевиной из фосфоросиликатного стекла.
- Предложена концепция плавного управления оптическими свойствами висмутовых волоконных световодов с сердцевиной из фосфоросиликатного стекла за счёт использования W-дизайна. Показано, что такой подход может быть использован для создания активной среды с широким, плоским контуром оптического усиления за счет взаимного перекрытия полос усиления ВАЦ-Si и ВАЦ-P.
- Обнаружен эффект насыщения выходной мощности волоконных лазеров (с накачкой по оболочке) на переходах висмутовых активных центров, ассоциированных с атомами Si (BAЦ-Si), при их возбуждении излучением на длине волны 808 нм. Предложена его интерпретация, основанная на недостаточной заселенности верхнего лазерного уровня из-за медленной релаксации ВАЦ-Si с вышерасположенного уровня.

#### Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы определяется установлением особенностей формирования ВАЦ с полосами люминесценции в области длин волн 1,3 – 1,4 мкм, основанных, в том числе, на выполнении численных расчетов экспериментальных зависимостей насыщения поглощения и люминесценции, приведших к определению коэффициента конверсии, т.е. эффективности формирования ВАЦ; разработкой феноменологической модели для описания экспериментального наблюдаемого фотоиндуцированного процесса разрушения ВАЦ, ассоциированных с фосфором, благодаря которой выявлены закономерности протекания таких процессов в стеклообразных материалах, а также построением модели работы висмутовых волоконных лазеров с накачкой по оболочке, которая позволила установить механизм ограничения их выходной мощности и условия его возникновения.

Практическая значимость работы заключается в реализации волоконнооптических устройств на основе разработанных активных сред (висмутовых световодов со сложным профилем легирования): накачиваемый по сердцевине волоконный лазер на световоде G-дизайна с ограниченной областью легирования, работающий с дифференциальной эффективностью почти 80%; оптический усилитель на висмутовом фосфоросиликатном световоде W-дизайна с шириной (по уровню -3 дБ) спектра усиления >120 нм при вариациях усиления <2 дБ в диапазоне длин волн 1330 – 1450 нм; волоконно-оптический усилитель для Етелекоммуникационного диапазона с усилением >20 дБ и коэффициентом шума <5 дБ при рекордно-минимальной используемой мощности накачки 45 мВт (эффективность усиления 0,52 дБ/мВт). Кроме того, были проведены исследования переходных процессов (быстродействие) и перекрестных помех (кроссмодуляционных эффектов) висмутового усилителя, предназначенного для Одиапазона (1260 – 1360 нм), результаты которого показали возможность применения усилителей практического таких В многоканальных высокоскоростных системах оптической связи.

#### Методология и методы исследования

В работе следующие использованы методы исследования: волнодисперсионный рентгеновский микроанализ; энергодисперсионный микроанализ; абсорбционная и люминесцентная спектроскопия; лазерная спектроскопия. Кроме того, применялись методы получения усиления и непрерывной лазерной генерации в квази-трех- и трехуровневой схеме при оптическом возбуждении.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

• Коэффициент конверсии ионов Ві в висмутовые активные центры, ассоциированные с атомами Si, в германосиликатных световодах (G-дизайна) с кольцевым и центральным легированием составляет 10-35% и зависит от химического состава стеклянной матрицы и общей концентрации висмута.

- Процесс фотоиндуцированной деградации висмутовых активных центров, ассоциированных с фосфором, соответствует химической реакции первого порядка с энергией активации 1,24 1,98 эВ, скорость протекания которой заметно выше для фосфоросиликатных световодов с W-дизайном по сравнению со стандартными световодами (со ступенчатым профилем показателя преломления).
- Германосиликатные световоды G-дизайна, активированные висмутом, обладают рекордно низким уровнем ненасыщаемого поглощения <2% вблизи 1400 нм от общего уровня, что обеспечило возможность получения лазерной генерации в ближней ИК области с дифференциальной эффективностью 80% и 5% при использовании одно- и многомодовых источников накачки, соответственно.
- Ограничение роста выходной мощности волоконных лазеров на переходах висмутовых активных центров, ассоциированных с атомами Si (ВАЦ-Si), формирующихся в том числе и германосиликатных световодах G-дизайна, при накачке длине волны 808 нм вызвано медленной релаксацией ВАЦ-Si с вышерасположенного энергетического уровня на метастабильный (лазерный) уровень.

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов определяется применением хорошо известных и апробированных методов исследования световодов, проведением сравнительного анализа данных, полученных различными методиками, созданием работающих оптических устройств, использованием современного сертифицированного научного оборудования.

#### Апробация работы

Результаты исследований докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: г. Москва, Прохоровские недели 2022, 18 – 20 октября 2022 года; г. Санкт-Петербург, International Conference on Laser Optics

(ICLO), 20 – 24 июня 2022 года; г. Пермь ВКВО-2023, октябрь 2023 г, а также представлялись на семинарах НЦВО РАН и ИОФ РАН в виде устных докладов.

#### Структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 67 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 130 наименований.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в 12 печатных научных статьях из перечня ВАК РФ, индексируемых в Web of Science и Scopus; а также 5 работах в виде трудов всероссийских и международных конференций.

Список статей по теме диссертации (в хронологическом порядке по убыванию):

1 Impact of doping profile on the formation of laser-active centers in bismuth-doped  $GeO_2 - SiO_2$  glass fibers / S.V. Alyshev, **A.S. Vakhrushev**, A.M Khegai [et al.] // Photonics Research. -2024. - Vol. 12. - Issue 2 - P. 260-270.

2 Непрерывные висмутовые волоконные лазеры с многомодовой диодной накачкой / **А.С. Вахрушев**, С.В. Алышев, А.М. Хегай [и др.] // Автометрия. – 2023. – Т. 59. – №. 1. – С. 5-14.

Переводная версия:

Continuous-Wave Bismuth-Doped Fiber Lasers with Multimode Diode Pumping / **A.S. Vakhrushev**, S.V. Alyshev, A.M. Khegai [et al.] // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2023. – Vol. 59. – Issue 1. – P. 1-9.

- 3) Cladding pumped bismuth-doped fiber amplifiers operating in O-, E-, and S-telecom bands / **A.S. Vakhrushev**, A.M. Khegai, S.V. Alyshev [et al.] // Optics Letters. 2023. Vol. 48. Issue 6. P. 1339-1342.
- 4 Висмутовый волоконный лазер с накачкой в оболочку световода, излучающий в области длин волн 1.3 1.4 мкм / **А.С. Вахрушев**, А.В. Харахордин, А.М. Хегай [и др.] // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. №. 8. С. 681-684. Переводная версия:

Cladding-Pumped Bismuth-Doped Fiber Laser Emitting in the Wavelength Range 1.3–1.4 µm / **A.S. Vakhrushev**, A.V. Kharakhordin, A.M. Khegai [et al.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2022. – Vol. 49 (Suppl 1). – P. S1-S6.

5 Cladding-pumped bismuth-doped fiber laser / S.V. Firstov, A.A. Umnikov, A.V. Kharakhordin, **A.S. Vakhrushev**, E.G. Firstova, S.V. Alyshev, A.M. Khegai, K.E. Riumkin, Y.Z. Ososkov, A.N. Guryanov, M.A. Melkumov // Optics Letters. – 2022. – Vol. 47. – Issue 4. – P. 778-781.

6 W-type and Graded-index bismuth-doped fibers for efficient lasers and amplifiers operating in E-band / **A.S. Vakhrushev**, A.A. Umnikov, A.S. Lobanov [et al.] // Optics Express. – 2022. – Vol. 30. – Issue 2. – P. 1490-1498.

7 Deterioration of Bismuth-Doped fiber lasers performance induced by blue and green laser light launched into cladding / S.V. Firstov, A.V. Kharakhordin, **A.S. Vakhrushev** [et al.] // Results in Physics. – 2022. – Vol. 34. – P. 105276.

8 Recent advances in Bi-doped silica-based optical fibers: A short review / A.M. Khegai, S.V. Alyshev, **A.S. Vakhrushev** [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids: X. – 2022. – P. 100126.

9 Double-Clad Bismuth-Doped Fiber with a Rectangular Inner Cladding for Laser Application / **A.S. Vakhrushev**, A.A. Umnikov, S.V. Alyshev [et al.] // Photonics. – 2022. – Vol. 9. – Issue 11. – P. 788.

10 Output power saturation effect in cladding-pumped bismuth-doped fiber lasers / **A.S. Vakhrushev**, Y.Z. Ososkov, S.V. Alyshev [et al.] // Journal of Lightwave Technology. – 2022. – Vol. 41. – Issue 2. – P. 709-715.

11 Переходные процессы и перекрестные помехи в висмутовом оптическом усилителе для О-диапазона / С.В. Алышев, А.В. Харахордин, А.М. Хегай, Я.Ж. Ососков, **А.С. Вахрушев**, Е.Г. Фирстова, К.Е. Рюмкин, М.А. Мелькумов, А.С. Лобанов, А.Н. Гурьянов, С.В. Фирстов // Квантовая электроника. − 2021. − Т. 51. − №. 7. − С. 630-634.

Переводная версия:

Transient processes and cross talk in an O-band bismuth-doped fibre amplifier / S.V. Alyshev, A.V. Kharakhordin, A.M. Khegai, Y.Z. Ososkov, **A.S. Vakhrushev**, E.G.

Firstova, K.E. Riumkin, M.A. Melkumov, A.S. Lobanov, A.N. Guryanov, S.V. Firstov // Quantum Electronics. – 2021. – Vol. 51. – Issue 7. – P. 630.

12 Combined effect of thermal and laser treatment on the destruction of active centers in Bi-doped phosphosilicate fibers / A.V. Kharakhordin, S.V. Alyshev, K.E. Riumkin, A.M. Khegai, **A.S. Vakhrushev**, E.G. Firstova, M.A. Melkumov, A.S. Lobanov, F.V. Afanasiev, A.N. Guryanov, S.V. Firstov // Optical Materials Express. – 2021. – Vol. 11. – Issue 4. – P. 1247-1258.

**Список докладов по теме диссертации** (в хронологическом порядке по убыванию):

1 Влияние профиля легирования на формирование лазерно-активных центров в волоконных световодах на основе германосиликатного стекла, легированного висмутом / С.В. Алышев, **А.С. Вахрушев**, А.М. Хегай [и др.] // Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2023). – Пермь: 2023. С. 239-240

- 2 Широкополосный висмутовый волоконный усилитель для O+E+S-телекоммуникационного диапазона с многомодовой накачкой / **A.C. Вахрушев**, К.Е. Рюмкин, А.М. Хегай [и др.] // Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2023). Пермь: 2023. С. 241-242.
- 3 **Вахрушев А.С.** Висмутовые волоконные лазеры с накачкой по оболочке, излучающие в области длин волн 1.4—1.5 мкм / **А.С. Вахрушев** // Школаконференция молодых учёных «Прохоровские недели». Тезисы докладов. М.: 2022. С. 7-10.
- 4 Cladding-pumped bismuth-doped fiber laser with brightness enhancement / **A.S. Vakhrushev**, A.V. Kharakhordin, Y.Z. Ososkov [et al.] // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, 20-24 June 2022, Russia, Saint Petersburg, doi: 10.1109/ICLO54117.2022.9840137
- 5 Efficient approach for gain spectrum management of Bi-doped fibers / A.M. Khegai, A.S. Lobanov, Y.Z. Ososkov, **A.S. Vakhrushev**, K.E. Riumkin, A.V. Kharakhordin, S.V. Alyshev, E.G. Firstova, A.N. Guryanov, M.A. Melkumov, S.V. Firstov // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, 20-24 June 2022, Russia, Saint Petersburg, doi: 10.1109/ICLO54117.2022.9840164

#### Личный вклад автора

Диссертация является результатом многолетних исследований автора, которые включали экспериментальное исследование, систематизацию, анализ и интерпретацию полученных данных. Цели и задачи исследования определялись научным руководителем. Получение висмутовых заготовок и вытяжка из них световодов осуществлялась в Институте химии высокочистых веществ Г. Г. Девятых РАН. Диссертантом проводились измерения оптических характеристик световодов, в частности, спектров поглощения слабого сигнала и зависимостей изменения поглощения от мощности вводимого сигнала, спектры люминесценции, времен жизни люминесценции. Кроме τογο, автором данной работы самостоятельно проводилась сборка оптических схем лазеров и усилителей в различных конфигурациях. Все измерения выполнялись лично диссертантом или при его непосредственном участии. Планирование экспериментов и анализ полученных результатов проводились совместно с научным руководителем и сотрудниками лаборатории волоконных лазеров и усилителей (ЛВЛУ) НЦВО РАН. Численный анализ и построение моделей процессов осуществлялось в тесном взаимодействии с с.н.с. ЛВЛУ С.В. Алышевым. Написание статей, ставших основой данной диссертационной работы, выполнялось в тесном сотрудничестве с сотрудниками лаборатории.

#### Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю доктору физико-математических наук Фирстову Сергею Владимировичу, гл. науч. сотруднику НЦВО РАН, за предложенную тематику данной научной работы, помощь в написании научных статей, диссертационной работы, а также за всестороннюю поддержку, которую он оказывал во всех возникающих научных вопросах и задачах. Его руководство, помощь, поддержка, профессионализм, терпение и понимание за время работы над диссертацией были неоценимыми, что послужило основанием для успешного достижения всех поставленных целей.

Автор выражает искреннюю признательность дружному коллективу лаборатории волоконных лазеров и усилителей НЦВО РАН: заведующему лабораторией М.А. Мелькумову, научным сотрудникам С.В. Алышеву, Е.Г. Фирстовой, К.Е. Рюмкину, А.В. Харахордину, А.М. Хегаю и аспиранту Я.Ж. Ососкову за помощь в проведении экспериментов, ценные дискуссии и замечания.

Автор признателен коллегам из Института химии высокочистых веществ Г.Г. Девятых РАН: бывшему руководителю лаборатории технологии волоконных световодов, члену-корреспонденту РАН А.Н. Гурьянову, и сотрудникам ИХВВ РАН А.А. Умникову, Ф.В. Афанасьеву, А.С. Лобанову, Н.Н. Вечканову, А.Н. Абрамову, которые внесли заметный вклад в создание заготовок и вытяжку висмутовых световодов, являющихся объектами исследований в данной работе.

Глава 1 Висмутовые световоды как активные среды для оптических устройств ближнего ИК-диапазона (Обзор опубликованных работ)

Целью данной главы диссертации, является обзор ранее проведенных исследований по изготовлению и изучению характеристик висмутовых световодов. Отдельно необходимо указать, что данный обзор и приведенные в нем результаты являются актуальными на момент начала диссертационного исследования.

#### 1.1. Процессы изготовления висмутовых световодов и их особенности

Процесс получения висмутовых волоконных световодов, аналогично активным световодам иного типа, включает несколько основных этапов: многостадийное изготовление преформы, подготовка к вытяжке (перетяжка, жакетирование) и непосредственно вытяжка. Поскольку висмут является элементом сильно склонным К химическим превращениям (изменение валентности, формирование комплексов т.д.), то каждый этап используемого способа изготовления может влиять на степень окисления Ві, что в конечном итоге выражается в изменении свойств получаемых образцов. Поэтому ряд научных коллективов попытался детально изучить данный вопрос, результаты которых будут далее обсуждаться.

При создании преформ висмутовых световодов, как правило, используются MCVD (модифицированное химическое осаждение из газовой фазы), SPCVD (поверхностное плазмохимическое осаждение из газовой фазы), FCVD (метод химического осаждения из газовой фазы с помощью печки в качестве нагревателя) технологии. На первом этапе MCVD процесса получения преформы происходит осаждение за счет термофореза на внутреннюю поверхность стандартной трубы стеклообразных пористых слоев сердцевины. На следующем этапе осуществляется процедура введения активной примеси путем пропитки раствором соединения

активатора или осаждением висмута из газовой фазы. FCVD процесс практически полный аналог MCVD [26], а отличие заключается лишь в используемом нагревательном элементе. В SPCVD процессе осаждение слоев происходит путем хемособрации, используя не горелку как в MCVD, а индуктор, который создает плазму, где и происходит синтез молекул оксидов в плазме, при температурах кварцевой трубы ниже температуры стеклования. Тем самым стеклообразный слой твердого раствора формируется, минуя стадию плавления в плазме. Возникают различные компоненты, которые до окисляются на поверхности кварцевой трубы, это является достаточно важным особенностью.

Первые световоды на основе  $Al_2O_3$ -SiO<sub>2</sub> стекла, легированного висмутом, были изготовлены в 2005 г. методом MCVD [3, 27]. Заметно позже, когда стало понятным, что состояние висмута может сильно меняться на каждой стадии создания преформы было выполнено систематическое исследование образцов с чистого кварцевого стекла (без неактивных примесей), легированного висмутом (Bi:SiO<sub>2</sub>), изготовленные методом FCVD со способом легирования активной добавки из раствора [28], изучая исходный прекурсор - BiCl<sub>3</sub>, растворенного в ацетоне (рисунок 1.1), пористые слои стекла, отожженные и спеченные в разных атмосферах (рисунок 1.2), заготовки и световоды. На микрофотографиях (рисунок 1.2(а-д)) образца, спеченного в воздушной атмосфере, видно, как термообработка изменяет микроструктуру и распределение висмута. Существуют переходная область, представляющая собой пористый слой, на внешней поверхности которого начинает образовываться стекло, легированное висмутом, которая формируется под воздействием нагретых газов от горелки в соседние менее нагретые области. Установлено, что в растворной технологии (пропитка) может иметь место сильная неоднородность по концентрации Ві в разных областях образца. В целом, хотелось бы отметить, что пропитка сильно зависит от состава и условий получения пористого стекла, т.к. качественная пористая структура свойственна не для всех стеклянных матриц и характеризуется разным размером и количеством получаемых пор. Это, несомненно, сказывается на эффективности введения висмута в пористые слои из-за различий в удерживании раствора. Так,

например, авторами работы [29] была продемонстрирована зависимость удерживания объема раствора в трубе с нанесенными пористыми слоями с разным размером и количеством пор от температуры спекания и химического состава стекла (рисунок 1.3).

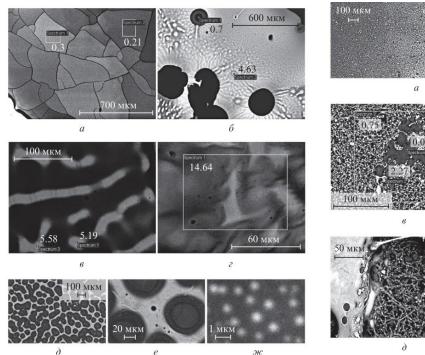


Рисунок 1.1 – Фотографии СН<sub>3</sub>–С(О)– СН<sub>3</sub>·ВіСl<sub>3</sub>, сделанные при помощи СЭМ. Рядом с обозначенными точками и областями приведена соответствующая концентрация висмута (в ат.%) [28].

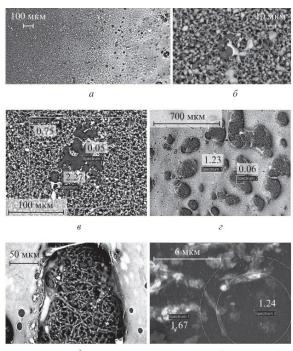


Рисунок 1.2 – Фотографии образца спеченного в атмосфере воздуха, сделанные в различных его областях при помощи СЭМ в режиме отраженных электронов в Z-контрасте. Числами обозначена концентрация висмута в ат. % в отмеченных точках и участках [28]. Область пористого слоя (слева) и переходная область (справа) – а, область пористого слоя – б, образование участка стекла (размером ~100 мкм) в переходной области (ближе к области пористого слоя) - в, образование стекла в переходной области (ближе к спеченной области) – г, один из «кратеров», в увеличенном масштабе - д и спеченная область - е).

Показано, что при повышении температуры спекания пористого слоя наблюдается резкое снижение удерживаемого объема раствора в порах, что свидетельствует об уменьшении количества и размера пор в нем. Из кварцевого стекла с высоким содержанием германия (близких к 50 мол.%) не представляется возможным сформировать качественный пористый слой и пропитать его соответствующим раствором, поскольку пористый слой получается достаточно тонким, что приводит к его разрушению.

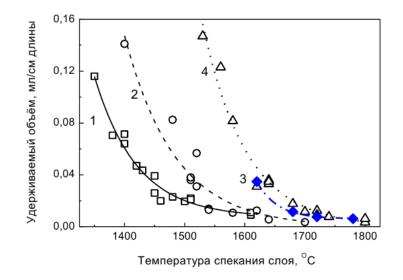


Рисунок 1.3 — Зависимость объема раствора, удерживаемого единицей длины трубчатой заготовки, от температуры спекания осажденного пористого слоя различного состава: 1 — 20 мол. %  $GeO_2$ ; 2-15 мол. %  $GeO_2$ ; 3-3.6 мол. %  $GeO_2$ ;  $4-SiO_2$  [29].

При невысоких концентрациях  $GeO_2$  в матрице стекла, с увеличением концентрации данного оксида происходит уменьшение температуры спекания, оказывая негативное влияние на удерживаемый объем раствора в порах (рисунок Поэтому для создания методом пропитки висмутовых световодов с сердцевиной из кварцевого стекла с оксидом германия необходимо использовать небольшую его концентрацию (меньше 20 мол.%). Следует отметить, склонность висмута к восстановлению ДО металлического состояния формированию кластеров, а также неоднородность его распределения, может выражаться в особенностях висмутовых световодов с разной концентрацией, а именно, в появлении высокого уровня ненасыщаемого поглощения. действительно было обнаружено в ряде исследований (например, [30, 31, 32]), где

было показано, что для разных концентраций висмута зависимость концентрации получаемых ВАЦ (спектры поглощения ВАЦ в фосфоросиликатных световодах показаны на рисунке 1.4а) в световодах является линейной, а для ненасыщаемого поглощения характерна нелинейная зависимость от общей концентрации висмута (рисунок 1.4б). Это свойственно для образцов, полученных при введении висмута, как методом пропитки, так и газофазным осаждением. Установлено, что снижение ненасыщаемых потерь в висмутовых световодах (из газовой фазы) можно обеспечить за счет повышения температуры спекания легированных слоев стекла. Типичная зависимость уровня ненасыщаемых потерь в  $P_2O_5$ -SiO<sub>2</sub> стекле с висмутом от температуры спекания пористых слоев показана на рисунке 1.4в.

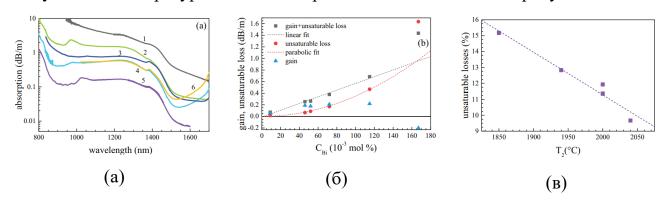


Рисунок 1.4 – (а) Спектры оптического поглощения фосфоросиликатных световодов, легированных висмутом (образцы: 1 – 0,167 мол.%; 2 – 0,115 мол.%; 3 – 0,072 мол.%; 4 – 0,046 мол.%; 5 – 0,009 мол.%; 6 – 0,052 мол.%); (б) Усиление, ненасыщаемые потери и усиление + ненасыщаемые потери в зависимости от общей концентрации висмута для температуры спекания 1850 °C; (в) Уровень ненасыщаемых потерь в оптических волокнах, легированных висмутом, на длине волны 1230 нм в процентах от поглощения малого сигнала на одной и той же длине волны при различных температурах спекания, используемых при изготовлении преформ [30].

В случае использования BiCl<sub>3</sub> в виде прекурсора в работе [28] предполагалось, что к появлению высокого уровня ненасыщаемых потерь приводит более сильное химическое сродство висмута к хлору по сравнению с кислородом. Это приводит к тому, что в процессе спекания пористого слоя с BiCl<sub>3</sub> в потоке кислорода температура повышается до 1900 °C и в конечном итоге парогазовая смесь, образующаяся в пористом слое и состоящая в основном из атомов и молекул Bi, Bi<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, вытекает из его объема в поток газа (кислорода

или гелия), а оставшаяся часть формирует комплексы металлического висмута в виде почерневшего пористого слоя (рисунок 1.2).

Следует отметить, что выбор исходного соединения висмута в качестве прекурсора является важной составляющей технологического процесса. В частности, при полностью газофазной технологии в зону реакции подается соединение либо металлоорганического соединения висмута (например, трибутил висмута), либо галогенид висмута, которое разлагается при высокой температуре. В результате органические прекурсоры приводят к повышенному формированию ОН-групп, которые попадают в пористый стеклообразный слой. Это, в конечном итоге, приводит к большим оптическим потерям в ИК области (на длине волны 1380 нм) в световоде. Использование летучего соединения BiCl<sub>3</sub> имеет те же проблемы (низкий выход реакции, высокая склонность к формированию летучего соединения с висмутом и т.д.), что и при его использовании из раствора. Наиболее подходящим прекурсором на данный момент является бромид висмута ВіВг<sub>3</sub>, который способен эффективно разлагается в зоне реакции, не приводя к ухудшению оптического качества стекла. Однако следует отметить, что в условиях MCVD из газовой фазы на выходе реакции BiBr<sub>3</sub> с кислородом происходит образование, примерно в равных долях, низшего оксида висмута ВіО и элементарного висмута, а также димеров Ві2. Висмут в высшей степени окисления в этих условиях не образуется. В случае растворной технологии (пропитка) при консолидации в кислородной атмосфере (при атмосферном давлении), можно достичь преимущественно степень окисления висмута +3, что и определяет увеличения показателя преломления стекла сердцевины в заготовке. Такой вывод сделан авторами работы [28] из результатов сравнительного анализа ППП, расчетной концентрации висмута, поглощения и люминесценции заготовки, полоса поглощения в области длин волн 210 - 230 нм (рисунок 1.5). Кроме того, ионы  $\mathrm{Bi}^{2+}$ с полосами люминесценции на 600 и 720 нм также могут присутствовать в сетке стекла. Показано, что формирование Ві<sup>2+</sup> и ВАЦ, идентифицируемых по полосам поглощения 820 и 1400 нм и люминесценции на 830 и 1430 нм, при спекании

пористого слоя и сохраняются или исчезают на последующих стадиях одновременно.

Следует отметить, что влияние тепловой обработки полученной преформ при ее масштабировании (перетяжки) и жакетировании на формирование ВАЦ и иных форм висмута до сих пор не понятно.

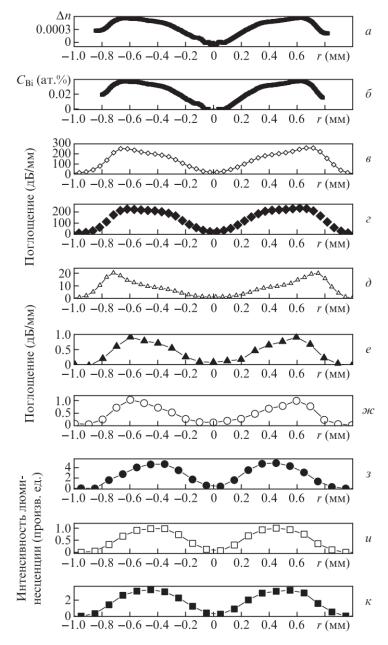


Рисунок 1.5 — Профиль показателя преломления ( $\Delta n = n_{\text{серд}} - n_{\text{обол}}$ ) (а); распределение концентрации висмута, рассчитанной по ППП (б); распределение величины поглощения на  $\lambda_{\text{погл}} = 198$  (в), 222 (г), 258 (д), 380 (е) и 440 нм (ж); распределение величины люминесценции ( $\lambda_{\text{возб}} = 337$  нм) на  $\lambda_{\text{изл}} = 600$  (з), 720 (и) и 830 нм (к) [28].

Следующим важным этапом, влияющим на свойства висмутовых световодов, является процесс вытяжки. Так, в работе [28] упоминается, что при вытяжке (температура более 2000°C) и отжиге (при температуре 1100°C) полых световодов в зависимости от атмосферы внутри отверстий могут быть реализованы как восстановительные, так и окислительные условия для висмута, приводящие к появлению или подавлению люминесценции ВАЦ, соответственно. Лазерные характеристики изготавливаемых висмутовых световодов также сильно зависят от скорости и температуры вытяжки, что тщательно изучено в работе [31]. Основной вывод в том, что это обусловлено изменением отношения величин активного поглощения и ненасыщаемых потерь в световодах, легированных висмутом, которое возрастает с увеличением скорости вытяжки (рисунок 1.6 б). Аналогичные были зависимости экспериментально получены ДЛЯ германосиликатных световодов с высоким содержанием  $GeO_2 \sim 50$ мол.%[33].

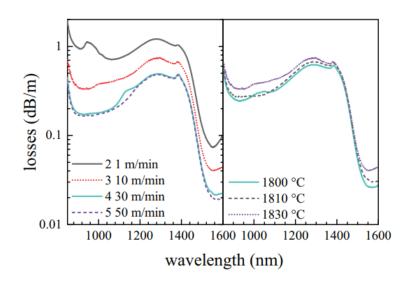


Рисунок 1.6 – Спектры оптических потерь в световодах, легированных висмутом, вытянутых при различных скоростях и температурах [30].

Из анализа литературы следует, что спектроскопические свойства стеклянных световодов с висмутом, полученных методом SPCVD, в значительной степени совпадают с аналогичными для изготовленных MCVD методом. На рисунок 1.7 показаны характерные полосы люминесценции, имеющие максимум в области длины волны 1400 нм [34]. Кроме этой полосы люминесценции авторы

наблюдали в осажденном и проплавленном стекле красную люминесценцию в области длин волн 620–650 нм с временем затухания около 3 мкс.

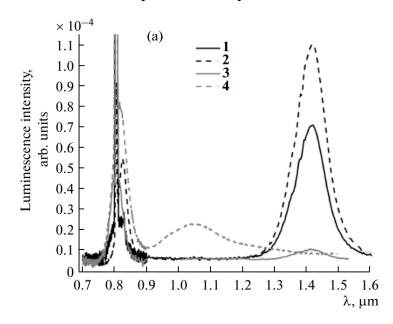


Рисунок 1.7 — Спектры фотолюминесценции висмутсодержащих образцов: 1 и 2 — осажденный и проплавленный слои, соответственно, образцы с сердцевиной из чистого кварцевого стекла 3 и 4 — осажденный и проплавленный, соответственно, образцы с алюмосиликатной сердцевиной, измеренные при возбуждении на длинах волн 808 нм.

Помимо стандартных методов изготовления, предпринимались попытки изготовить висмутовые световоды методом VAD [35, 36]. К преимуществам данного метода можно отнести высокую скорость осаждения, что позволяет получать преформы большего размера с одной стороны, и повлиять на химические реакции Ві в стекле. Однако данный метод оказался трудоемким по сравнению с MCVD процессом за счет более сложного поддержания постоянных технологических условий путем точного регулирования расхода сырья, расхода газов, температуры пламени, температуры поверхности формируемой преформы, скорости вращения и положения конца преформы. Колебания положения пористого конца преформы вызывали изменения диаметра и показателя преломления. В результате указанные недостатки не позволили в полной мере применить данной метод для получению висмутовых световодов высокого оптического качества.

Как правило, применение новых методов изготовления висмутовых материалов были вызваны невозможностью использования стандартных. Например, CVD технология трудно сочетается с получением чистого кварцевого стекла с висмутом, поскольку использование высоких температур для спекания пористых стеклообразных слоев такого состава приводило к полному испарению висмута. В этом случае, как оказалось, более эффективным подходом было использовании технологии «порошок в трубке». В результате исследований свойств висмутовых световодов, разработанных по данной технологии, удалось впервые показать, что широкополосная люминесценция в области длин волны 1400 нм, наблюдаемая до этого момента, в различных матрицах на основе кварцевого стекла обусловлена исключительно формированием ВАЦ, ассоциированных с Si атомом [37]. На таких световодах были представлены результаты ON/OFF усиления [38, 39], а в работе [40] было уже продемонстрировано оптическое усиление и лазерная генерация. Однако, данная технология дает большие оптические потери в световодах, связанных с рассеянием на неоднородностях в сетке стекла, которые составляют  $\sim 0.5$  дБ/м, что критически сказывается на качестве получаемых образцов.

Таким образом, в заключении стоит отметить, что, хотя висмутовые световоды показывают чувствительность различным параметрам К технологического процесса, тем не менее, при соответствующем их контроле можно достигать приемлемой воспроизводимости свойств световодов. Однако для усовершенствования характеристик висмутовых световодов необходим дополнительный комплекс исследований, который бы позволил тщательнее понять происходящие трансформации Ві в стекле на каждом этапе. Следует отметить, что оптические свойства висмутовых световодов, получаемых с помощью различных технологий, являются близкими, т.е. происходит формирование одного и того же типа ВАЦ, хотя некоторая вариативность существует, однако не такая сильная, чтобы кардинально изменить общее положение дел. В настоящее время MCVD технология является относительно простым и эффективным способом получения заготовок и световодов с ВАЦ высокого качества, имеющих заданные оптического

свойства, что в совокупности дает все предпосылки для их использования в качестве лазерно-активных материалов.

# 1.2. Общие характеристики ВАЦ: типы, диаграмма энергетических уровней, полосы поглощения и люминесценции

Значительное влияние матрицы стекла сердцевины на спектральнолюминесцентные свойства ВАЦ связано со строением электронных оболочек атома висмута (с электронной конфигурацией нейтрального атома [Xe]  $4f^{14}$   $5d^{10}$   $6s^2$   $6p^3$ ). При такой структуре электронной оболочки, где на внешней р-орбитали расположены 3 электрона, локальное окружение иона висмута определяющую роль на формирование оптических центров и энергетических переходов. Как оказалось, в случае висмута изменение химического состава матрицы стекла сердцевины позволяет существенным образом трансформировать ВАЦ, что в результате приводит к появлению полос люминесценции в совершенно другой спектральной области, например, в алюмосиликатной матрице наблюдается полоса люминесценции в области длины волны 1,1 мкм, тогда как в высокогерманатной матрице – в области длины волны 1,7 мкм. Если говорить о механизме появления ИК люминесценции, то, с одной стороны, она, несомненно, обусловлена присутствием в составе стекла висмута, так как без висмута ИК люминесценция не наблюдается. С другой стороны, в стеклах с высоким содержанием Ві<sup>3+</sup> (~50 мол.%) ИК-люминесценция и соответствующие полосы поглощения практически не наблюдаются [41, 42]. Следовательно, структура активного центра, ответственного за ИК люминесценцию, включает атом висмута в состоянии, отличном от трехвалентного. Это также подтверждается рядом работ, где показано, что формирование висмутовых центров происходит в условиях сильного восстановления. Проведенные исследования [43, 44] указывают на то, что для формирования ВАЦ необходимо выполнить по меньшей мере два условия: вопервых, ион Bi должен находиться в степени окисления +n ( $\leq +2$ ), во-вторых,

создать благоприятное локальное окружение вблизи него. Систематическое изучение абсорбционных и люминесцентных свойств, наряду с условиями изготовления, висмутовых световодов привело к установлению нескольких важных фундаментальных закономерностей, которые позволили классифицировать ВАЦ с характерной системой энергетических уровней [45, 46, 47]. На рисунках 1.8 и 1.9 приведено обобщенное представление основных результатов, касающихся различных типов ВАЦ, достигнутых к настоящему времени.

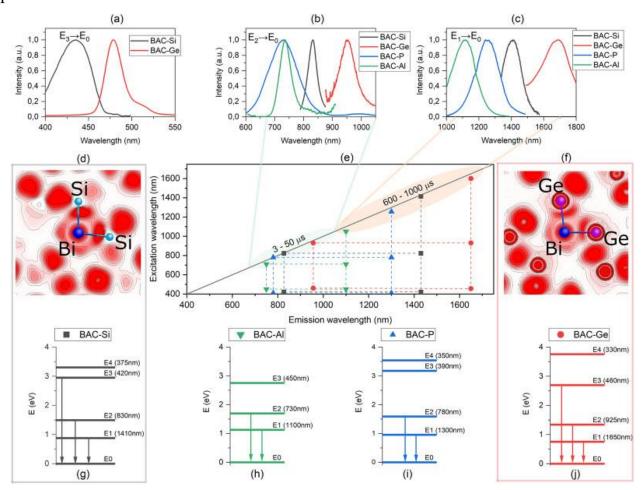


Рисунок 1.8 – Основные характеристики ВАЦ: основные полосы люминесценции (a, b, c), взаимное расположение основных полос люминесценции в ближнем ИК-диапазоне и диапазоны соответствующих времен жизни люминесценции (e); конфигурации энергетических уровней ВАЦ (g, h, i, j); возможная структура ВАЦ-Si и ВАЦ-Ge получены из расчета (d, f).

Из подробного систематического исследования люминесцентных и абсорбционных характеристик различных типов ( $Al_2O_3$ - $SiO_2$ ,  $P_2O_5$ - $SiO_2$ ,  $GeO_2$ - $SiO_2$ ) световодов, легированных висмутом, была получена взаимосвязь полос

поглощения и люминесценции (на рисунке 1.8 (а-с) показаны основные полосы люминесценции, возникающие в результате переходов с разных возбужденных уровней в основное состояние различных типов ВАЦ) с определенным типов ВАЦ, который преимущественно формируется в исследованной стеклянной матрице. В результате это позволило выделить 4 типа ВАЦ, которые были классифицированы по характерной неактивной добавке в стеклянной матрице на основе кварцевого стекла, а именно ВАЦ, ассоциированный с атомом Al, P и Ge. Кроме того, следует отметить, что помимо BAЦ-Al/P/Ge, в таких световодах могут существовать BAЦ, ассоциированные с атомом Si, которые преимущественно формируются в чистом кварцевом стекле или с небольшой добавкой оксида германия. Для каждого типа ВАЦ определены положения энергетических уровней. Построенные схемы энергетических уровней, принадлежащие различным ВАЦ, с оптическими переходами, ответственными за соответствующие полосы люминесценции, показаны на рисунке 1.8 (g-j). На рисунке 1.8 (e) схематично изображено взаимное расположение основных полос (максимум каждой полосы люминесценции представлен соответствующим символом) ИК люминесценции и их значения времени жизни для определенного ВАЦ. Это позволяет понять качественные различия и сходства между ВАЦ. На основе представленных уровней энергии видно, что все типы активных центров обладают определенным сходством энергетических диаграмм, и разница заключается только в значениях энергий соответствующих переходов. Эти данные стали основой для сравнительного анализа разрабатываемых моделей ВАЦ, ассоциированных с Si и Ge [48]. На рисунке 1.8 (d, f) показана возможная структура таких ВАЦ, полученная в результате компьютерного моделирования.

На рисунке 1.9 представлены спектры поглощения существующих висмутовых световодов. Видно, что полученные спектры состоят из нескольких полос, принадлежащих различным ВАЦ. Как уже выше упоминалось, несколько типов ВАЦ могут сосуществовать в одной стеклянной матрице. Это схематически проиллюстрировано с помощью набора цветных колоколообразных кривых, каждый из которых принадлежит соответствующему ВАЦ. Помимо полос

поглощения ВАЦ для такого типа световодов характерным является высокий уровень ненасыщаемых оптических потерь, что, по-видимому, обусловлено эффектами кластеризации. Именно по этой причине лазерно-активные висмутовые световоды содержат чрезвычайно низкие концентрации ионов висмута, которые не превышают 0,02 ат.% [49]. Это, в свою очередь, усложняет изучение структурных особенностей ВАЦ в световодах с использованием общепринятых аналитических методов. Другой особенностью висмутовых световодов является то, что по оценкам количество ВАЦ сильно (на 1-2 порядка) отличается от общего содержания висмута [50]. Остальная доля висмута (почти ≈90%) не проявляют люминесцентных свойств в ближней ИК области. В этом отношении поиск возможных подходов, которые могут достичь увеличения концентрации ВАЦ, и возможных способов превращения неактивных форм висмута в активные, является важной научной задачей. Безусловно, что данная научная проблема сопряжена с детальным пониманием структурных особенностей ВАЦ, а также физикохимических процессов, ответственных за формирование активных и неактивных форм висмута в аморфных материалах [23, 34, 51, 52].

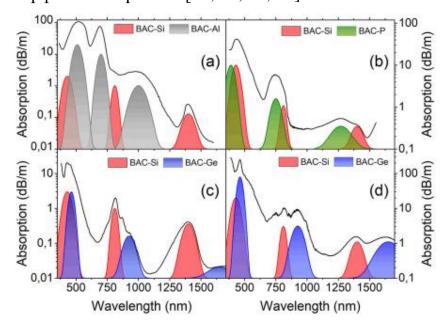


Рисунок 1.9 — Спектры поглощения висмутовых световодов с сердцевиной, изготовленной из: (a)  $Al_2O_3$ - $SiO_2$  стекла; (б)  $P_2O_5$ - $SiO_2$  стекла; (в, г)  $GeO_2$ - $SiO_2$  стекла с низким, высоким содержанием оксида германия, соответственно. Показаны характерные полосы, принадлежащие различным типам ВАЦ.

Изучение особенностей ВАЦ, проявляющихся в том или ином виде, например, их чувствительность к лазерному излучению, которая выражается в виде постепенного разрушения их структуры (фотообесвечивания) [53, 54, 55], являются эффективным способом для получения новых знаний о физической природе ВАЦ. Эффект фотообесцвечивания ВАЦ был обнаружен для различных типов ВАЦ. Был определен ряд особенностей протекания данного процесса, включая тот факт, что интенсивность скорость обесцвечивания снижаются при температуры [54]. Более того, с увеличением энергии фотонов интенсивность процесса разрушения ВАЦ возрастает, способствую более сильной деградации свойств активной среды. Следует отметить, что разрушение ВАЦ-Si происходит не только под воздействием излучения на длинах волн, попадающих в полосы поглощения ВАЦ, но и иных, например, 532 и 407 нм, что свидетельствует о возможных различных механизмах данного процесса [55]. Степенная зависимость скорости процесса обесцвечивания от мощности используемого излучения на длине волны 532 нм позволила сделать вывод о том, что деградация ВАЦ-Ge может быть обусловлена разрушением кислородно-дефицитного дефекта в окрестности иона висмута, входящего в структуру ВАЦ. Кроме того, было показано, что существуют обратимые процессы, т.е. происходит полное восстановление обесцвеченных ВАЦ-Ge после термической обработки при температурах 400-500 °C [55, 56, 57]. Детальный анализ процесса термообработки, основанный на использовании концепции демаркационной энергии, позволил определить характерную энергию активации процесса восстановления, которая составила ~0,5 эВ (рисунок 1.10), подтверждая гипотезу о механизме фотообесцвечивания [58, 59, 60]. Помимо восстановления обесцвеченных ВАЦ, температурная обработка висмутовых световодов приводит к активации процессов формирования новых (дополнительных) ВАЦ-Ge, итоговый прирост которых может достигать более 2 раз [57]. Энергия активации данного процесса составляет почти 1 эВ, как видно на рисунке 1.10. Авторы рассуждая о механизме формирования ВАЦ предполагают, что прекурсоры ВАЦ образуются до термической обработки световода, а сам процесс образования дополнительных ВАЦ обусловлен

диффузией кислородных вакансий (кислородо-дефицитные центров) [57]. Что касается неактивных форм висмута, ответственных за ненасыщаемые потери, то они имеют отличную от ВАЦ природу, поскольку процесс их формирования характеризуется более высокими скоростями и энергиями (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Расчетное распределение энергии активации g(E) для изучаемых процессов (пунктирные линии). Экспериментальные данные ненасыщаемых потерь показаны звездами.

По сравнению с ВАЦ-Si и ВАЦ-Ge на данный момент фотообесцвечивание ВАЦ-P практически не исследовалось. Лишь в работе [55] было показано, что интенсивность люминесценции ВАЦ-P с максимумом на длине волны 1300 нм заметно снижается при облучении на длине волны 407 нм. Других систематических исследований к началу выполнения данной работы не было опубликовано.

#### 1.3. Лазерные и усилительные свойства висмутовых световодов

Данный раздел будет посвящен рассмотрению основных результатов, достигнутых в области получения оптического усиления и лазерной генерации, на основе световодов, легированных висмутом.

#### Висмутовые волоконные лазеры

Оптическая схема висмутовых лазеров, как правило, представляет собой стандартную конфигурацию с линейным резонатором Фабри-Перо, состоящим из активного световода, длина которого варьируется для поиска оптимальной, и зеркал в виде волоконных брэгговских решеток (ВБР). Коэффициент отражения выходного зеркала изменяется от 4 до 98% в зависимости от экспериментов. Как оказалось, оптимальные коэффициенты выходного зеркала для достижения высоких значений коэффициента полезного действия (КПД) лазеров составляли <10%, т.е. когда в активной среде обеспечивается высокий уровень инверсной населенности (оценочно более 60%). До настоящего времени источниками накачки таких лазеров выступали одномодовые лазеры, как правило, ВКР лазеры, излучение которых вводилось через высокоотражающую ВБР (на рабочей длине волны лазера) в сердцевину активного световода. В таком случае лазерная система работает по квазитрехуровневой схеме, т.е. ВАЦ, поглощая фотоны накачки, из основного состояния переходят непосредственно на метастабильный (лазерный) уровень – резонансное возбуждение. Лазерная генерация получается на этом же переходе (с других подуровней). Очевидно, что для достижения лазерной генерации в различных спектральных областях такая конфигурация требует наличия специфических одномодовых источников накачки высокой мощности аспект будет обсуждаться далее). Это накладывает определенные ограничения на практическую ценность висмутовых лазеров. О висмутовых лазерах, имеющих ввод накачки по оболочке с использованием недорогих многомодовых диодов, до сих пор не сообщалось в научной литературе. Основные результаты в данном направлении были достигнуты преимущественно как демонстрация свойств и возможностей такой активной среды, как висмутовых световодов (рисунок 1.11, таблица 1.1) [61].

Первый лазер на основе световодов, легированных висмутом, был создан в том же году (2005 год), что и изготовлен MCVD методом световод такого типа [62]. Поскольку материалом сердцевины было алюмосиликатное стекло с висмутом, то и усиление на оптическом переходе ВАЦ-АІ было сосредоточено в области длин

волн 1,15 — 1,22 мкм, где и была достигнута лазерная генерация. Максимально достигнутый КПД висмутовых лазеров на основе световодов с сердцевиной из алюмосиликатного стекла составляет 28%, а максимальная выходная мощность лазерного излучения — 15 Вт. При уменьшении температуры окружающей среды с комнатной до 77 °К, наблюдается повышение КПД до 50%, что, по-видимому, обусловлено снижением расселения лазерного уровня из-за процессов поглощения из фотонов накачки ВАЦ-Аl, находящихся в возбужденном состоянии [63].

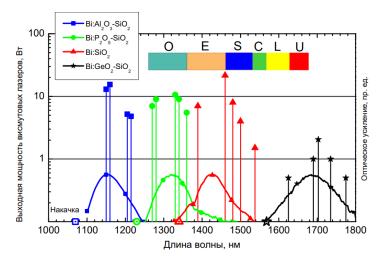


Рисунок 1.11 — Спектральное распределение длин волн генерации висмутовых волоконных лазеров и спектры оптического усиления на основе световодов с различной матрицей стекла сердцевины и максимально достигнутые выходные мощности генерации [61].

В настоящее время непрерывные лазеры на основе световодов с сердцевиной из алюмосиликатного стекла, легированного висмутом, практически не исследуются, т.к. в этом спектральном диапазоне существуют более эффективные аналоги (ВКР-лазеры и лазеры на основе световодов, легированных иттербием), которые успешно применятся в различных отраслях.

Таблица 1.1 - Основные рекордные характеристики висмутовых волоконных лазеров на момент начала данной работы.

ВАЦ	Al	P	SI	GE
Диапазон длин	1150 – 1220	1260 – 1360	1360 – 1460,	1625 – 1775
волн, нм			1460 - 1530	
КПД, %	28	40	60	33
$P_{MAX}$ , $Bm$	15	~10	22	2

Прогресс по расширению спектрального диапазона работы висмутовых лазеров был связан с разработкой новых разновидностей висмутовых световодов, легированных висмутом, в материале сердцевины которых не требовалось присутствия Al, хотя он изначально считался неотъемлемым компонентом при формировании ВАЦ. Для этой цели были разработаны световоды с фосфоро-, фосфорогермано-, германосиликатной сердцевиной с висмутом, химический состав которых был в последствии оптимизирован под конкретный спектральный диапазон.

На данный момент предельная длина волны генерации висмутовых лазеров, которая экспериментально получена, составляет 1775 нм. В качестве материала сердцевины использовалось германосиликатное стекло с содержанием GeO2 >50 мол.%. Следует отметить, что такие световоды способны генерировать оптическое излучение в широком диапазоне длин волн от 1625 до 1775 нм [64, 65] при накачке на длине волны 1,46 – 1,57 мкм. Максимально достигнутая эффективность таких лазеров составила 33% (с отражением выходного зеркала 4%) и выходной мощностью лазерного излучения 2 Вт на длине волны 1700 нм [32]. Длина активного световода в этом случае составила 25 м. Следует отметить, что на основе таких световодов была продемонстрирована лазерная генерация в чисто трехуровневой возбуждение ВАЦ-Ge схеме, когда происходило вышерасположенный уровень по отношению к лазерному. В таком случае лазерная генерация была достигнута на длине волны около 1.55 мкм при накачке на 925 нм [66]. Кроме того, в указанном диапазоне длин волн была получена лазерная генерация с дифференциальной эффективностью 18% на висмутовых световодах после термообработки, которая инициировала появление дополнительных ВАЦ-Ge. В таком случае удалось сократить длину резонатора лазера до рекордной величины 8,5 м [67].

Наиболее интенсивные исследования в области разработки висмутовых лазеров осуществлялись для получения когерентного излучения в спектральных областях 1260–1530 нм (перекрывая О-, Е- и S- телекоммуникационные диапазоны) [68, 69]. Для этого использовались оптические переходы ВАЦ, ассоциированных с

фосфором и кремнием (раздел 1.2, рисунок 1.8, і). У данных лазеров КПД было выше, чем у предыдущих рассмотренных лазеров и составлял примерно 40% для рабочей длины волны 1330 нм (длина волны накачки 1230 нм) при комнатной температуре. Рекордные значения эффективности 60% показывали лазерные источники, работающие около 1460 нм, на переходах ВАЦ-Si в германосиликатных световодах (с низким содержанием GeO<sub>2</sub><10 мол.%). Максимальная выходная мощность таких лазеров достигала 22 Вт [70]. Такие лазеры имели низкую чувствительность к температурным условиям (изменение КПД на 100°С составило всего лишь 1.9%). Следует отметить, что лазерная генерация в данном диапазоне длин волн была получена также с использованием алюмосиликатных световодов и световодов из чистого кварцевого стекла [40, 71]. Это оказалось возможным благодаря формированию в них ВАЦ, ассоциированных с атомом Si.

Для получения рекордных величин выходной мощности висмутовых лазеров предпринимались усилия по реализации подходящих источников накачки, которые, как правило, имели достаточно сложные многокаскадные конструкции. Так, например, на рисунке 1.12 показана типичная схема накачки висмутового лазера по сердцевине и сам висмутовый лазер [70]. Видно, что источник накачки представляет собой конструкцию из последовательно соединенных источников различного типа: иттербиевый лазер, накачиваемый блоком полупроводниковых лазерных диодов; ВКР лазер. Как уже выше упоминалось, это связано с низкой концентрацией ВАЦ в лазерно-активных световодах и относительно небольшими значениями сечений поглощения ВАЦ в ближнем ИК-диапазоне. Попытки использовать накачку на длине волны ~800 нм в коротковолновые полосы фосфорогерманосиликатного световода с висмутом оказались поглощения успешными. Была продемонстрирована лазерная генерация на длине волны 1320 нм [72]. Однако эффективность таких лазеров была очень низкой, а отсутствие мощных одномодовых источников на 800 нм не позволили улучшить полученные результаты.

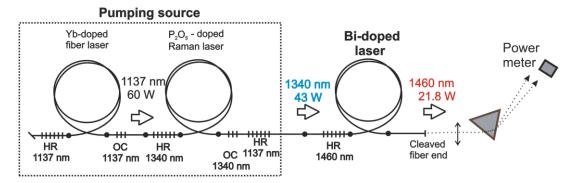


Рисунок 1.12 – Типичная схема накачки висмутового лазера по сердцевине и висмутовый лазер, работающий в области E- и S-диапазона [70].

Тем не менее, данный результат позволил задуматься о возможности использования многомодовых коммерчески доступных мощных лазерных диодов как источников накачки для висмутовых лазеров. Подобные устройства уже давно показывают впечатляющие результаты по масштабированию выходных мощностей лазеров на основе световодов, легированных редкоземельными ионами [73]. К настоящему моменту были опубликованы научные работы, где демонстрировались попытки получить оптическое усиление вблизи 1,31 мкм в алюмосиликатном световоде, легированном висмутом, с накачкой многомодовыми ЛД на 800 нм [35, 36, 74]. Однако, до сих пор в литературе не сообщалось об успешном создании висмутовых лазеров с многомодовой диодной накачкой, что усиливало интерес к решению данной проблемы.

### Висмутовые волоконные усилители

В отличие от лазеров, висмутовые усилители уже сейчас являются привлекательными оптическими устройствами для решения практических задач в области телекоммуникаций, связанных с расширением спектральной области передачи данных (Рисунок 1.13). Заметная часть работ в области висмутовых световодов связана именно с исследованием параметров получаемых устройств. По этой причине в научной литературе встречаются работы, в которых приведены экспериментальные данные по разным конфигурациям висмутовых усилителей (одно- и двухпроходные, встречной, попутной или двунаправленной накачкой, с применением двухволновой накачки, с фиксированием усиления и т.д.).

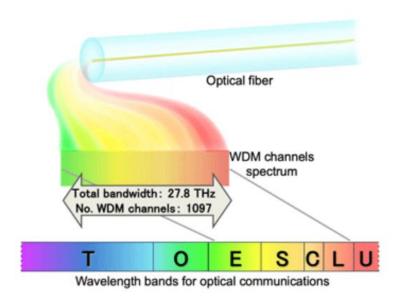


Рисунок 1.13 — Возможная спектральная область для передачи данных по оптическим системам связи [75].

Как правило, висмутовые усилители обладают широкой полосой (~ 40 нм по уровню -3 дБ) оптического усиления, имеющей максимум на длине волны 1330 (ВАЦ-Р), 1430 (ВАЦ-Si) или 1700 (ВАЦ-Ge) нм, в зависимости от используемого типа висмутового световода. Для висмутовых алюмосиликатных световодов, где имеется выраженный эффект поглощения фотонов накачки ВАЦ в возбужденном эффективность состоянии [76]. усиления является самой низкой существующих висмутовых световодов и составляет менее 0,01 дБ/мВт. Висмутовые усилители в области длин волн 1600 - 1800 нм обладают примерно на порядок величины лучшей эффективностью усиления (~0,1 дБ/мВт), для которых также характерным является типичный уровень усиления 23 дБ на длине волны 1710 нм при шум-факторе около 7 дБ [18]. Подобные результаты были получены на висмутовых фосфоросиликатных световодах, где достигнутое усиление в Одиапазоне (1260 – 1360 нм) было более 24 дБ, ширина спектра усиления на полувысоте составила 37 нм, а шум-фактор меньше 6 дБ при эффективности усиления 0,1 дБ/мВт [43]. С помощью комбинации длин волн двухволновой накачки 1240 нм и 1267 нм, в таких усилителях может быть получен плоский контур оптического усиления 25±1 дБ и коэффициент шума <6 дБ в диапазоне длин волн от 1320 до 1360 нм. Двухпроходная конфигурация усилителя позволяет

достичь прироста на 100% по сравнению с однопроходной конфигурацией, как утверждается в работе [77]. В последние годы в мире появилась новая структура (W-дизайн) фосфоросиликатного световода с висмутом, который позволил получить компактный усилитель в О-диапазоне с усилением 20 дБ для сигналов от –40 дБм до –10 дБм в диапазоне длин волн 1300–1350 нм и рекордным коэффициентом усиления в 0,18 дБ/мВт для длины волны накачки 1230 нм (эффективность преобразования мощности накачки в сигнал >27%) [78, 79]. Наиболее эффективными висмутовыми усилителями с точки зрения потребляемой мощности, т.е. величина усиления в дБ на 1 мВт накачки, являются усилители для Е+S-диапазона (1360 — 1530 нм), которые способны обеспечить усиление оптического сигнала вблизи 1430 нм на 24 дБ с шум-фактором 5-6 дБ при мощностью накачки 65 мВт от коммерчески доступного одномодового ЛД на длине волны 1310 нм [80]. Спектры усиления и шума-фактора такого устройства показаны на рисунок 1.14. Такой усилитель работал с рекордным значением эффективности 0.4 дБ/мВт.

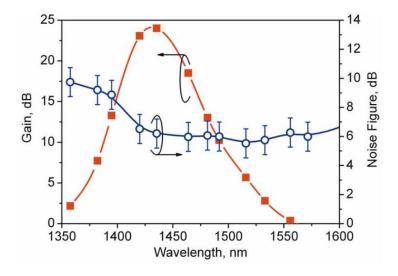


Рисунок 1.14 — Спектр усиления и шум-фактор усилителя слабого сигнала на основе переходов ВАЦ-Si [80].

В таблице 1.2 показаны текущие результаты висмутовых усилителей зарубежных лабораторий и лаборатории из НЦВО РАН для наиболее перспективных областей, О- и Е-диапазон. С недавних пор к висмутовым усилителям приковано заметное внимание со стороны крупных

телекоммуникационных компаний (Huawei, Nokia Bell Labs, KDDI, NICT и др.). В настоящее время эти компании стали пользователями/разработчиками/ тестировщиками висмутовых усилителей.

Таблица 1.2 - Основные параметры висмутовых волоконных усилителей на момент начала данной работы.

	Результаты, полученные другими научными		Результаты, полученные в НЦВО РАН					
	группал	ии (накачка в	(накачка в сердцевину)					
сердцевину)								
Спектральный диапазон	O [81]	E [16, 82, 83]	O [49]	E [80]				
Параметр								
Пиковое усиление, дБ	~29	~30	~25	~30				
Шум-фактор (NF), дБ	<5,5	~5	5-6	6				
Ширина полосы (-3дБ), нм	~40	30-50	37	36				
Длина световода, м	75-100	320	140	140				

К примеру, R&D компании OFS недавно представлены результаты работы висмутового усилителя в схеме восьмиканального оптического приемопередатчика «LR-8 LAN-WDM» со скоростью 400 Гбит/с на расстояние до 50 км по стандартному оптоволоконному кабелю (G.652) [84]. В 2023 году OFS и Viavi Solutions Inc. представили свою совместную разработку – первый коммерческий продукт висмутовый усилитель «МАР mOFA-C1» для О-диапазона [14, 85] **OFS** (Рисунок 1.15). также проводит совместные работы японской телекоммуникационной компанией «KDDI Research» ДЛЯ тестирования висмутовых усилителей в реальных "полевых" системах связи [86]. Другая научная группа (университет Саутгемптона) продемонстрировала передачу сигналов в Одиапазоне 4×50 Гбит/с на расстояние до 100 км с применением висмутового усилителя, достигнув таким образом, рекордную дальность передачи данных в Одиапазоне со скоростью 50 Гбит/с на сегодняшний день [5]. Компания Huawei продемонстрировала возможность использования висмутового усилителя для получения усиления в спектральной области, близко расположенной к диапазону усиления эрбиевых усилителей [15, 87]. Взаимодействие различных научноисследовательских институтов и компаний NICT, Amonics, Aston University и др. привело к получению мирового рекорда по скорости передачи данных 301 ТБ/с по стандартному оптическому волокну [88].



Рисунок 1.15 — Внешний вид первого коммерческого висмутового усилителя для О-диапазона, разработанного компанией Viavi совместно с OFS [14].

Важным направлением, которое также начинает активно развиваться в рамках создания новых висмутовых усилителей, является поиск возможных эффективных способов по реализации единого оптического усилителя с широкой спектральной областью. Уже получен ряд перспективных результатов по созданию висмутовых усилителей с единым контуром усиления, покрывающего O+E-, E+S или C+L+U, более 100 нм продемонстрированы в работах [16, 17, 89, 90, 91].

Все вышеперечисленное свидетельствует, что решение научных задач в области разработки и исследования висмутовых световодов, является актуальным как с научной, так и с практической точек зрения.

### 1.4. Выводы к Главе и постановка задач исследования

Из литературного обзора следует, что к настоящему времени накоплен ряд нерешенных вопросов, касающихся механизма формирования ВАЦ, их особенностей на примере различных дизайнов световодов, получаемых вариацией распределения активных и неактивных добавок в процессе получения заготовки световода.

Наибольший интерес представляют световедущие структуры с неравномерным распределением легирующих примесей (например, G-дизайн, W-

дизайн и структуры с пьедесталом). Это обусловлено малой изученностью особенностей формирования висмутовых активных центров в таких структурах, характеризующихся неравномерным радиальным распределением легирующих добавок (ограниченным легированием), а также отсутствием информации о коэффициентах конверсии Ві→ВАЦ, его вариации в зависимости от химического состава стекла. Интерес состоит в том, что легирующие (неактивные) добавки являются неотъемлемым компонентом, влияющим на формирование ВАЦ, поэтому их распределение, даже при равномерном распределении висмута, будет определять профиль распределения ВАЦ. Характер взаимного распределения висмута и легирующей добавки, а также областей легирования (оболочка или особенно вблизи сердцевина), границ раздел сред, характеризующихся повышенным дефектообразованием, могут влиять на ненасыщаемые потери и перераспределение висмутовых центров, ответственных за их появление. В таком случае изучение активных световодов с неравномерным распределением легирующих добавок может рассматриваться как одним из подходов для поиска оптимальных концентраций и профиля легирования висмутовых световодов с целью получения активных сред с улучшенными характеристиками.

Другой научной задачей данной работы, требующей систематического подхода к исследованию, являлось изучение фото- и термоиндуцированных процессов в фосфоросиликатных световодах, легированных висмутом, с целью определения энергий активации формирования/разрушения ВАЦ, построение феноменологической модели изучаемого процесса и выявления особенностей исходя из сравнительного анализа с другими типами ВАЦ.

С точки зрения практической направленности, основной задачей данной работы являлось определение возможности использования разработанных висмутовых световодов для создания оптических устройств с улучшенными выходными характеристиками, в том числе реализованными с применением оригинальных подходов.

## Глава 2 Описание экспериментальных установок и использованных методов исследования

В настоящей главе представлены способы изготовления и некоторые характеристики висмутовых световодов, которые выступали объектами исследования настоящей работы. В первой части данной главы кратко описана МСVD (modified chemical vapor deposition) технология изготовления висмутовых световодов различного дизайна с фосфоросиликатной и германосиликатной сердцевиной, которые были разработаны в тесном сотрудничестве коллективов из НЦВО РАН и ИХВВ РАН. Кроме того, кратко описаны методы исследования основных (люминесцентных, абсорбционных, лазерных и др.) свойств висмутовых световодов.

# 2.1. Описание технологии получения преформ и световодов, легированных висмутом, с различным профилем показателя преломления и легирования

В качестве способа производства исследуемых образцов висмутовых световодов использовался метод модифицированного химического парофазного осаждения (MCVD – Modified Chemical Vapor Deposition). Процесс изготовления висмутовых световодов является многостадийным и трудоемким, поэтому в данном разделе будут рассмотрены лишь основные этапы изготовления: получение постобработка заготовки-преформы, (перетяжка ДО меньшего диаметра, жакетирование) заготовки и вытяжка из нее световодов. Для получения преформы использовалась опорная кварцевая труба (Heraeus F-300), внутрь которой подавались реагенты в виде хлоридов кремния/германия/фосфора для послойного осаждения стеклообразных слоев сердцевины. Процесс получения сердцевины происходил активного световода В два этапа: осаждение стеклообразного слоя на внутреннюю поверхность вращающейся опорной трубы

обратным проходом, т.е. когда зона реакции, создаваемая кислород-водородной горелкой, смещается навстречу потоку хлоридов; проплавление осажденного пористого слоя при подаче прекурсора висмута и кислорода прямым проходом. В качестве прекурсора висмута использовалось химическое соединение — бромид висмута (ВіВг<sub>3</sub>) с газом-носителем Аг или Не. Таким образом, проводилось послойное осаждение нескольких слоев при контролируемом изменении потоков реагентов для получения требуемого распределения легирующих добавок. Для создания W-дизайна (рисунок 2.1) перед нанесением слоев сердцевины осуществлялось осаждение F-содержащих слоев кварцевого стекла, служащих депрессированной (т.е. с пониженным показателем преломления) оболочкой. После получения трубки с осажденными и проплавленными слоями стекла с висмутом, проводилась процедура ее консолидации (получение однородного стеклянного стержня) при температуре свыше 2000 °C в среде ССІ<sub>4</sub>.

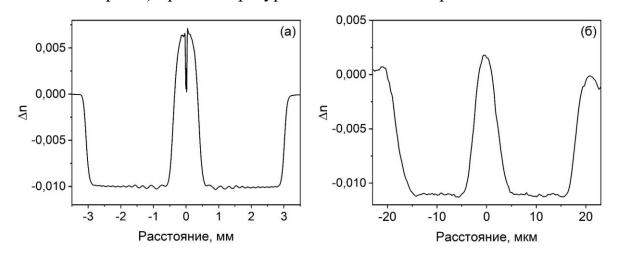


Рисунок 2.1 – ППП W-дизайна в преформе (a) и световоде (б).

На следующем этапе проводилась дополнительная обработка заготовки путем перетяжки до соответствующих геометрических размеров и последующего жакетирования (осаждение дополнительной кварцевой трубы) для получения требуемых пропорций диаметров сердцевина/оболочка. Это необходимо для получения висмутового световода с заданной длиной волны отсечки высших мод. Следует отметить, что некоторые заготовки проходили процесс механической шлифовки и полировки внешних слоев заготовки для создания определенной формы световедущей оболочки. После этого полученная заготовка помещалась на

вытяжную башню, где она нагревалась до температур около 1850-1900 °C, и из нее вытягивалась стеклянная нить (световод) с внешним диаметром 125 мкм. В процессе вытяжки покрывался защитным полимерным покрытием с показателем преломления выше или ниже кварцевого стекла в зависимости от его дальнейшего применения.

Измерения ППП в преформе осуществлялось с помощью профилометра Photon Kinetics 2600, а в световоде – Photon Kinetics S14. Типичные профили в получаемых заготовках и световодах G- и W-дизайна представлены на рисунке 2.2. Видно, что в преформе, при создании двухступенчатого ППП трансформируется в градиентный профиль (G-дизайн) в световоде за счет диффузионных процессов. Для W-дизайна диффузионные процессы присутствуют, что преимущественно выражается в появлении заметного количества F в сердцевине световода, приводя к снижению показателя преломления стекла сердцевины. Следует отметить, что полученные данные согласуются с данными по распределению легирующих добавок в сердцевине, показанными на рисунке 2.3. Дополнительные особенности дизайна исследуемых световодов будут непросредственно рассмотрены при обсуждении полученных результатов (Главы 3 – 5).

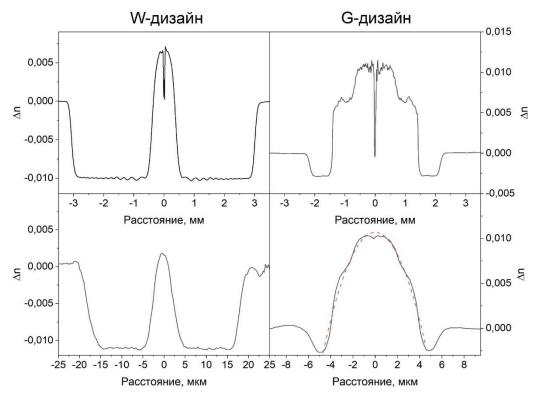


Рисунок 2.2 – Типичные ППП в получаемых заготовках и световодах G- и W-дизайна.

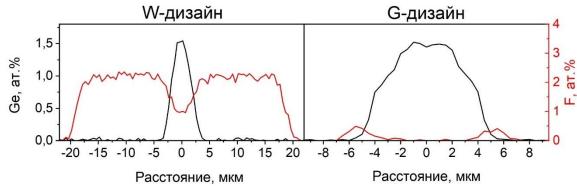


Рисунок 2.3 – Радиальное распределение легирующих добавок в сердцевинах световодов с G- и W-дизайном.

## 2.2. Методы исследования абсорбционных и люминесцентных свойств висмутовых световодов

Абсорбционные свойства висмутовых световодов в заданном спектральном диапазоне определялись «метод облома» с использованием слабого (в этом случае изменением инверсной населенностью пренебрегается) и большого сигнала [92]. Данный метод основан на сравнении уровня прошедшего сигнала по длинному и короткому отрезкам световода. В случае слабого сигнала использовался широкополосный источник излучения И постоянной интенсивностью рассматриваемом диапазоне длин волн (галогеновая лампа). Источником большого сигнала, как правило, служили волоконные лазеры собственного производства, мощность которых варьировалась в заданном интервале величин, а длина волны излучения сохранялась неизменной. Коэффициент оптического поглощения вычислялся по следующей формуле:

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L_{\text{длин}} - L_{\text{корот}}} \cdot log_{10} \frac{P_{\text{корот}}(\lambda)}{P_{\text{длин}}(\lambda)}, \tag{2.1}$$

где,  $L_{\partial nuh}$  и  $L_{\kappa opom}$  — длина длинного и короткого отрезка, соответственно, а  $P_{\partial nuh}(\lambda)$  и  $P_{\kappa opom}(\lambda)$  — мощность сигнала, прошедшего через длинный и короткий отрезок световода, соответственно. Данный способ апробирован для измерения поглощения слабого сигнала, распространяющегося по сердцевине или внутренней оболочке. В зависимости от этого для ввода и вывода излучения использовались

либо одномодовые, либо многомодовые пассивные волоконные световоды. Измерение спектральных зависимостей коэффициента поглощения висмутовых световодов проводилось с помощью оптических спектроанализаторов Agilent 86140B (с одномодовым входным разъемом) и HP 70004A (с многомодовым входным разъемом) для ближней ИК области и Ocean Optics USB2000 для видимой области спектра (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Схема измерения оптических потерь при слабой мощности сигнала.

Метод облома для большого сигнала позволял получить мощностные зависимости изменения оптических потерь на дискретных длинах Остаточный уровень потерь в таком случае называется ненасыщаемые потери, уровень которых оказывает влияние на эффективность получаемых устройств на основе активные световодов. Схема измерения данным методом представлена на рисунке 2.5. Источником сигнала, как выше было сказано, служил волоконный лазер, мощность которого оставалась постоянной. Изменение мощности сигнала, вводимого в активный световод, осуществлялось с помощью перестраиваемого аттенюатора. Для контроля вводимой мощности в исследуемый образец использовался делитель мощности 1/99, где 99% дальше в образец и через образец в измеритель мощности №1, а 1% отводился в измеритель мощности №2. Длина исследуемого образца подбиралась таким образом, чтобы при вводе большого сигнала не привело к появлению лазерной генерации из-за френелевского отражения от торцов и сварочных соединений световодов. Коэффициент оптического поглощения также определялся по формуле (2.1) с учетом мощности входной и прошедшего сигнала через длинный и короткий отрезок световода. Для измерения мощности прошедшего сигнала использовался измеритель Ophir Nova №2 с сенсором 3A-FS.

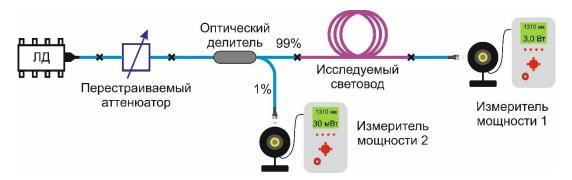


Рисунок 2.5 – Схема измерения оптических потерь от мощности большого сигнала.

В качестве лазерных источников излучения использовались ВКР-лазеры, работающие на длинах волн 1230, 1310 и 1340 нм с мощностями до 2 Вт.

Для изучения люминесцентных свойств висмутовых световодов использовались основные методы люминесцентной спектроскопии: спектры люминесценции и зависимости насыщения люминесценции при непрерывном возбуждении, зависимости затухания люминесценции при импульсном возбуждении.

Измерение спектров люминесценции висмутовых световодов проводилось по схеме, изображенной на рисунке 2.6, которая включала волоконную GTWave конструкцию, источник накачки и спектроанализатор. Волоконная GTWave конструкция состоит из двух близкорасположенных световедущих жил таких, что при распространении оптического излучения в одной из них происходит частичное перетекание в другую. Следует отметить, что одна из жил содержит центральную область (сердцевину), где может распространяться излучение без вытекания.

Как видно из рисунка 2.6, активный световод сварным соединением пристыковывался к световедущей жиле с сердцевиной, по которой распространялось излучение накачки. Сигнал люминесценции ВАЦ высвечивался в разные направления частично захварываясь модами оболочки световедущей жилы и распространяясь в обратном направлении достигало спектроанализатора. Перед измерением с исследуемого образца механически удалялось полимерное покрытие для распространения люминесценции по оболочке за счет полного внутреннего отражения на границе кварцевое стекло-воздух.

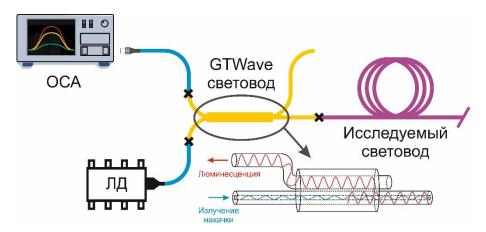


Рисунок 2.6 – Схема измерения спектров люминесценции висмутовых световодов.

Для измерения зависимостей насыщения люминесценции, также, как и для временных зависимостей затухания люминесценции, использовалась данная экспериментальная схема. Однако в случае спектроскопии насыщения измерения спектров люминесценции проводились при различных мощностях накачки в непрерывном режиме, тогда как для временных зависимостей источник накачки работал в импульсном режиме (длительность импульса — 5 мкс), а сигнал регистрировался фотоприемниками Thorlabs PDA10D-EC.

### 2.3. Схема измерения усилительных свойств световодов

Одним из важных параметров, характеризующих качество активного световода, является величина оптического усиления. В данной работе для измерения коэффициента усиления световода и его спектральную зависимость использовалась экспериментальная установка с синхронным детектированием (рисунок 2.7). Методика измерения усиления заключалась в сравнении мощности сигнала  $S_{\text{усил}}$ , прошедшего через отрезок активного световода с накачкой, и мощности вводимого  $S_{\text{ввод}}$  сигнала, прошедшего через измерительную схему без активного световода (с учетом поправок на потери на сварных соединениях). Формула для расчета коэффициента оптического усиления G имеет следующий вид:

$$G = 10 \cdot log_{10} \left( \frac{S_{\text{ввод}}}{S_{\text{усил}}} \right) \tag{2.2}$$

В качестве источника сигнала использовался суперконтинум (Fianium), из широкого спектра которого вырезалась узкая полоса излучения при помощи акустооптического фильтра (АОФ). Сканирование по длине волны в эксперименте позволяло получать коэффициент усиления в заданном диапазоне перестройки, т.е. по сути спектр усиления. Излучение накачки вводилось через волоконный 3-дБ делитель (Каплер 50/50). Вводимый сигнал модулировался при помощи механического модулятора-прерывателя (МП), для устранения влияния усиленной спонтанной люминесценции. Выходной сигнал из схемы попадал на решеточный монохроматор, и, затем, регистрировался фотодиодом (InGaAs детектор).

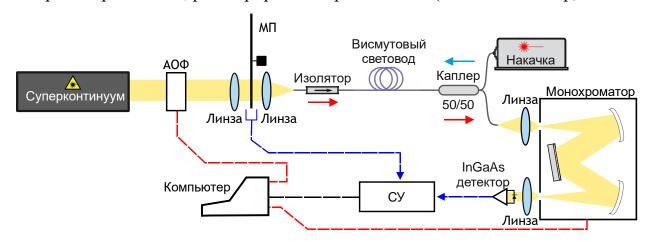


Рисунок 2.7 – Схема для измерения усилительных свойств активных световодов; синхронный усилитель (СУ).

## 2.4. Конфигурации волоконно-оптических устройств (лазер, усилитель): основные принципы построения, особенности

Для изучения генерационных характеристик активных световодов с накачкой в сердцевину использовалась относительно несложная схема в виде линейного резонатора Фабри-Перо (рисунок 2.8), в которой излучение от ВКР-лазера, выступающего в качестве источника накачки, проходило через высокоотражающее зеркало, а именно, ВБР, и вводилось в висмутовый световод. В качестве выходного зеркала использовался выходной торец висмутового световода, сколотый под прямым углом, что обеспечивало 4% отражение.

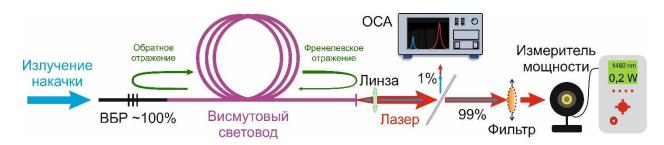


Рисунок 2.8 – Принципиальная схема висмутового лазера с накачкой в сердцевину.

На выходе использовалась коллимирующая линза, позволяя получить плоскопараллельный пучок света. Интерференционные фильтры применялись для устранения непоглощенного излучения накачки, как видно на рисунке 2.8. Также в процессе измерений выходной мощности лазера регистрировался спектр излучения с помощью вышеуказанных спектроанализоторов.

При исследовании параметров висмутовых лазеров с накачкой по оболочке экспериментальная схема претерпевала значительные изменения (рисунок 2.9). В этом случае можно было использовать встречную или попутную (в зависимости от направления распространения генерируемого излучения и излучения накачки) конфигурации. Для ввода излучения накачки от многомодовых ЛД на длине волны 793 нм и 808 нм использовался многомодовый объединитель (2+1)х1 (МОН), т.е. излучение накачки распространялось по внутренней оболочке световода, а генерируемое излучение по сердцевине. Максимальная мощность накачки от ЛД на длине волны 808 нм составляла 25 Вт, 793 нм – 20 Вт. Длина активного световода варьировалась в зависимости от экспериментов, особенно в случае оптимизации конфигурации лазера для получения наилучших выходных характеристик. Для устранения непоглощенной мощности накачки (УНМН), распространяющейся по оболочке, после активного световода было установлено устройство для вывода излучения накачки. Обратная связь в резонаторе лазера обеспечивалась зеркалами, которые в зависимости от проводимых экспериментов представляли собой либо ВБР, либо торец световода, сколотый под прямым углом, либо более закрытые резонаторы, на основе зеркал Саньяка.

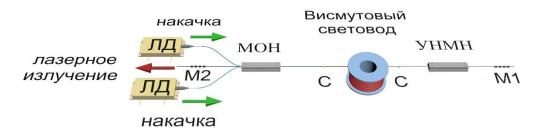


Рисунок 2.9 – Типичная схема висмутового лазера с накачкой в оболочку (конфигурация со встречной накачкой); М1 и М2 – зеркала в резонаторе лазера, С – сварки с висмутовым световодом.

Также, как и для лазеров с накачкой по сердцевине, в данных экспериментах проводились измерения зависимостей выходной мощности от мощности накачки, спектров излучения лазерной генерации.

Схема волоконно-оптического усилителя в сильной степени совпадает со схемой для соответствующего лазера, только вместо зеркал на входе и выходе усилителя размещались оптические изоляторы для того, чтобы лазерная генерация не возникала. Для схемы с накачкой по оболочке использовался тот же оптический элемент – многомодовый объединитель накачки и сигнала (2+1)х1, тогда как в экспериментах с накачкой по сердцевине – одномодовый спектрально-селективный объединитель, который специальным образом подбирался с учетом используемых длин волн накачки и сигнала. При выполнении данной работы проводились исследования параметров усилителей в различных конфигурациях: с попутной, встречной и двунаправленной накачкой. Методика измерения и расчета коэффициента усиления соответствовала общепринятому подходу, описанному выше. Измерения коэффициента усиления устройств проводились для различных мощностей накачки и входного сигнала. Однако в отличие от анализа усилительных свойств активной среды, для усилителя как устройства помимо коэффициента усиления существует еще один из важный практически значимый параметр для оценки влияния шума на усиливающий сигнал, который называется шум-фактор устройства (NF – noise figure). "Оптический шум" возникает из-за усиленной спонтанной люминесценции, которая возникает на фоне полезного (усиленного) сигнала. В общем виде, для определения шум-фактора любого (оптического, электрического) усилителя необходимо определить отношение

сигнал/шум на входе ( $SNR_{\rm ввод}$ ) в устройство к сигнал/шум на выходе ( $SNR_{\rm усил}$ ) по формуле:

$$NF = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{SNR_{\text{BBOД}}}{SNR_{\text{VCUЛ}}} \right) \tag{2.3}$$

Однако, для оптических усилителей общепринято расчет шум-фактора пользовать следующее выражение [93]:

$$NF = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{G} + \frac{P_{ASE}}{h \nu \Lambda \nu G} \right) \tag{2.4}$$

где  $P_{ASE}$  — мощность усиленной спонтанной люминесценции (amplified spontaneous emission (ASE)), приходящийся на интервал частот  $\Delta v$  (или спектральная плотность мощности);  $\Delta v$  — ширина линии пробного сигнала в частотном выражении.

Методика измерения шум-фактора усилителя заключалась в определении абсолютного значения уровня мощности спонтанной люминесценции, возникающей в усилителе. Для этого проводились измерения спектра спонтанной люминесценции с помощью калиброванного (для определения абсолютных значений) спектроанализатора. Другой способ заключался в прямом измерении мощности ASE на выходе устройства (без пробного сигнала) с помощью измерителя мощности. Зная спектр ASE можно определить  $P_{ASE}/\Delta v$ . Шум-фактор устройств в экспериментах измерялся для различных мощностей накачки.

Глава 3 Висмутовые  $GeO_2$ -Si $O_2$  световоды W- и G-дизайна для E+S-диапазона (1360 – 1530 нм)

Основные результаты данной главы опубликованы в работах [94, 95, 96].

Данная глава будет посвящена изучению вопросов, касающихся влияния радиального распределения висмута (Ві) и неактивных примесей, определяющих ППП световода, на эффективность формирования (коэффициент конверсии) висмутовых активных центров (ВАЦ), оптические свойства, включая лазерные и усилительные характеристики световодов. Основное внимание будет направлено на изучение световодов с сердцевиной из германосиликатного стекла, легированного висмутом.

## 3.1. Профиль показателя преломления, радиальное распределение Bi, висмутовых активных центров в исследуемых образцах

#### **G**-дизайн

В представлены разделе результаты исследования данном ПО систематическим исследованиям влияния распределения, концентрации Ві и неактивной добавки, ответственной за создание ППП, на эффективность было преобразования Ві→ВАЦ. Основное внимание сфокусировано исследовании свойств световодов G-дизайна, полученным заданным радиальным распределением оксида германия. Дизайн такого световода схематически представлен на рисунке 3.1 (а). Видно, что ППП состоял из центральной и периферийной областей, изготовленных из стекла, имеющего разный химический состав, в частности, различное содержание GeO<sub>2</sub>. Кроме того, вокруг сердцевины создавался слой с пониженным за счет добавления фтора показателем преломления (trench) для более сильной локализации поля фундаментальной моды световода в

центральной части сердцевины. На рисунке 3.1 (б) изображена фотография сердцевины в преформе, созданной методом MCVD, где отчетливо наблюдается, что каждая область включала ряд слоев стекла. В результате ППП полученных образцов имели двухступенчатую структуру, где показатель преломления в центральной части ( $\Delta n \sim 0.012$ ) был 1.5 выше, чем в периферийной области, прилегающей к границе раздела с оболочкой из кварцевого стекла. Типичный ППП заготовки представлен на рисунке 3.1 (в).

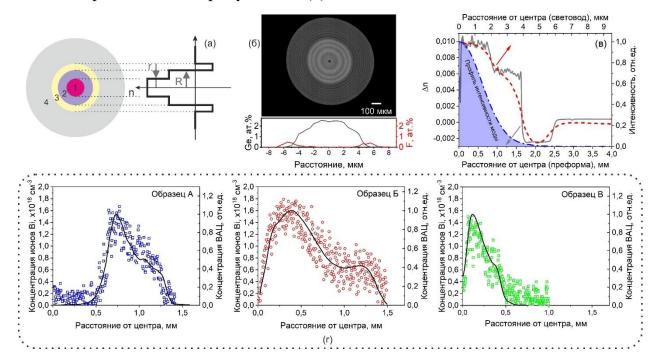


Рисунок 3.1 - a) Дизайн исследуемых световодов (G-дизайн); б) фотография сердцевины в преформе, полученной методом MCVD (центральная область с более высоким содержанием  $GeO_2$  ярче, чем периферийная; черный цвет соответствует оболочке из кварцевого стекла);

ниже представлены радиальные распределения атомов Ge и F; в) экспериментально полученный ППП заготовки (сплошная линия) и световода (пунктирная линия), профиль поля основной моды, рассчитанный с использованием ППП в световоде (штрих-пунктирная линия); г) радиальные распределения концентрации ионов Bi (символы) и относительного содержания ВАЦ (сплошная линия) в преформах A, Б и B.

Следует отметить, что площадь поперечного сечения центральной области в три раза меньше периферийной, так как R=2r в исследуемых образцах. Однако это не отражает вклад каждой области в оптические характеристики образцов, поскольку следует учитывать перекрытие профиля поля фундаментальной моды (рисунок 3.1, в) и распределение ВАЦ в соответствующих областях. На рисунке 3.1

(в) представлено распределение интенсивности фундаментальной моды световода, рассчитанного в программном пакете «Optiwave OptiFiber» исходя из измеренного ППП. В качестве объектов исследования была использована серия образцов вышеописанного дизайна, в которых радиальные распределения количества ионов висмута существенно отличались друг от друга. Так, образец А имел кольцевое легирование, т.е. Ві вводился исключительно в периферийную область; образец Б – равномерное легирование всех областей сердцевины; образец В – легирование центральной части. Также в экспериментах использовался образец Б", который отличался от образца Б, увеличенной примерно вдвое концентрацией Ві.

Радиальное распределение ионов висмута с пространственным разрешением 5 мкм по сердцевине исследуемых заготовок были получены с помощью метода волнодисперсионного рентгеновского микроанализа (ВРМ) с использованием микрозонда JEOL JXA 8200 (ток зонда 100 нА, ускоряющее напряжение 20 кВ). Предел обнаружения использованного оборудования составил 58 Полученные распределения атомов висмута в образцах А-В представлены на рисунке 3.1 (г). Как и ожидалось, из-за особенностей технологического процесса введения Ві и его физико-химических свойств, распределение ионов висмута в центральной и периферической областях (образец Б) было не совсем равномерным, как ожидалось, что может быть связано с испарением ионов висмута или процессом их диффузии из внутренних слоев во внешние слои. Интересно, что аналогичная особенность наблюдалась в образцах А и В, где внутренние слои стекла были обеднены ионами висмута. Тем не менее, оказалось, что пиковая концентрация во всех образцах A, Б и B составила  $\sim 1.6 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

С целью изучения особенностей формирования ВАЦ проводились также измерения радиального распределения относительной концентрации ВАЦ с использованием методики, основанной на люминесцентном анализе, подробно описанной в работе [97]. В этом случае интенсивность люминесценции ВАЦ-Si с максимумом на длине волны 1430 нм, возбуждаемой лазерным излучением на длине волны 798 нм, в данной точке соответствует их относительной концентрации. Радиальное распределение интенсивности люминесценции образца

получали последовательным поточечным сканированием (с шагом 100 мкм) по диаметру образца, измеряя спектры излучения, собранные световодом с диаметром 50 мкм (NA=0,22), расположенное на столике ThorLabs NanoMax 300. Спектры излучения образца измерялись с помощью спектрометра Ocean Optics NIRQuest. Для рассеянного возбуждающего света использовался интерференционный фильтр с краевой длиной волны 1000 нм, пропускающий длинноволновое излучение. Полученные распределения представлены сплошными линиями на рисунке 3.1 (г). Оказалось, что распределение ВАЦ с хорошей степенью точности совпадает с радиальным распределением общей концентрации висмута для всех образцов. Далее предполагалось, что полученное распределение сохраняется даже после вытяжки световода, которое использовалось для определения абсолютной концентрации ВАЦ и коэффициента конверсии.

#### W-дизайн

модификации стекла сердцевины, был использован основанный на изменении химического состава стекла оболочки, прилегающей к активной сердцевине. В данном случае был реализован германосиликатный световод W-дизайна (рисунок 3.2), когда вокруг сердцевины формировался слой стекла с пониженным показателем преломления. Преимущества использования такого профиля состоит в том, что за счет прилегающей к сердцевине области с пониженным показателем преломления удается управлять волноводными свойствами световода без изменения химического состава стекла сердцевины, которое привело бы к изменению свойств ВАЦ. Это, с одной стороны, позволит уменьшить диаметр сердцевины световода при сохранении длины волны отсечки световода, что способствует увеличению плотности мощности в сердцевине и производительности/эффективности лазерных позитивно скажется на усилительных систем на основе таких световодов. А, с другой, будет способствовать улучшению компактности устройств за счет увеличения локализации основной моды в сердцевине световода, т.е., по сути, за счет уменьшения оптических потерь на макроизгибах, обеспечив таким образом

возможность размещения световода на катушках малого диаметра <5 см. Важно отметить, что модификация состава стекла оболочки также может оказать дополнительное влияние на структурные особенности границы сердцевина-оболочка.

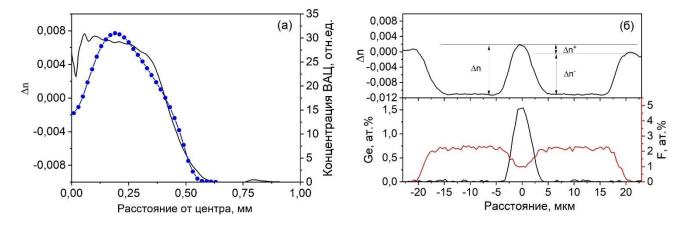


Рисунок 3.2 – Типичный вид W-дизайна заготовки (а) и световода (б) с сердцевиной из германосиликатного стекла (с низким содержанием германия), легированного висмутом (верхний график); распределение атомов Ge и F по радиусу световода, полученное методом рентгеновского энергодисперсионного микроанализа (нижний график). На рис. (а) показано радиальное распределение ВАЦ в заготовке световода.

ППП преформы исследованного образца И распределение концентрации ВАЦ-Si показаны на рисунке 3.2 (a). Высокая испаряемость висмута являлась причиной снижения концентрации ВАЦ в центральной части сердцевины преформы, как это можно наблюдать на рисунке 3.2 (а). В данном случае в сердцевину образца вводилась достаточно низкая концентрация GeO<sub>2</sub> (~5 мол.%) для преимущественного формирования ВАЦ-Si и снижения вероятности появления ВАЦ-Ge, поэтому разница показателей преломления сердцевины и кварцевой оболочки была относительно невысокой ~0,007. В световоде данный показатель заметно снижался до примерно 0,0013, что было обусловлено диффузией в стекло сердцевины атомов фтора. Типичный ППП такого световода показан рисунке 3.2 (б). Видно, что в световедущей структуре такого типа  $\Delta n \sim 0.013$  является суммой из двух слагаемых  $\Delta n^+ \sim 0{,}002$  (сердцевина по отношению к кварцевому стеклу) и  $\Delta n^{-} \sim 0.011$  (депрессированная оболочка по отношению к кварцевому стеклу). Как и ожидалось, радиальное распределение концентрации  $GeO_2$  коррелирует с  $\Pi\Pi\Pi$ .

Исходя из анализа концентрации атомов фтора в различных областях световода, необходимо подчеркнуть, что из-за значительной диффузии в центральной части световода находится заметное количество  $F \sim 1$  ат.%. Средняя концентрация висмута в образце была оценена на уровне  $\sim 10^{18}$  атомов в см<sup>-3</sup>.

### 3.2. Оптические свойства световодов. Коэффициент конверсии Ві→ВАЦ

Спектры поглощения слабого сигнала исследуемых образцов световодов G-и W-дизайна представлены на рисунке 3.3 (а) В полученных спектрах поглощения (образец Б) в спектральной области 1150 – 1700 нм присутствуют две отчетливых полосы с максимумом на 1410 и 1650 нм, которые, как уже ранее установлено, принадлежат ВАЦ-Si и ВАЦ-Ge, соответственно. Видно, что величина поглощения в полосе 1410 нм составляет 1,1 дБ/м для G-дизайна световода и 0,8 дБ/м для W-дизайна. Следует отметить, что хотя концентрация GeO<sub>2</sub> в световоде G-дизайна выше по сравнению с W-дизайна световодом, поглощение на 1650 нм выше для последнего световода.

На рисунке 3.3 (б) для сравнения показаны спектры поглощения висмутовых световодов (G-диазйна) с различным распределением активной измеренные в спектральном диапазоне 700 – 1650 нм. Спектры поглощения всех образцов имели сходную структуру, включающую характерные полосы на 1400 и 830 нм, соответствующие переходам  $E0 \rightarrow E1$  и  $E0 \rightarrow E2$ , соответственно (см. диаграмму уровней энергии ВАЦ-Si на рисунке 3.3 (г)). Как и ожидалось, в нашем случае повышенное поглощение (в диапазоне 0,6 – 1,1 дБ/м) было достигнуто в образцах с легированной Ві центральной областью (образцы Б и В), где наблюдается максимальное перекрытие концентрации ВАЦ и профиля интенсивности основной моды. Как видно, полоса на длине волны 830 нм имеет сложную структуру, в которой можно выделить ряд отдельных узких полос, что можно объяснить различными подтипами ВАЦ-Si из-за неоднородного уширения [24]. Полоса поглощения с максимумом на длине волны 1400 нм является более

широкой и менее структурированный, чем коротковолновая полоса. Неоднородный эффект уширения по отношению к ВАЦ-Si проявляется в смещении положения спектрального пика люминесценции на длине волны около 1400 нм в зависимости от длины волны возбуждения, попадающей в коротковолновую полосу поглощения ВАЦ-Si (в области с пиком на 820 нм). Это наглядно продемонстрировано на рисунке 3.3 (в), где можно наблюдать плавное смещение максимума люминесценции в более длинноволновую область с 1400 до 1440 нм при изменении длины волны возбуждения от 790 до 850 нм.

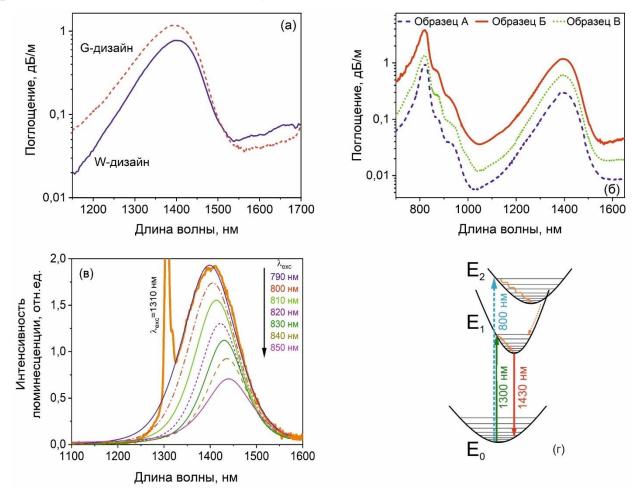


Рисунок 3.3 – (а) Спектры поглощения слабого сигнала легированных висмутом световодов различного типа; (б) Спектры оптических потерь исследуемых световодов с различным профилем легирования Ві (образцы А-В) от мощности; (в) Спектры люминесценции образца Б при возбуждении на различных длинах волн; (г) Диаграмма энергетических уровней ВАЦ-Si с абсорбционными (стрелка вверх) и излучательными (стрелка вниз сплошная линия) переходами, а также безызлучательными переходами (пунктирная линия).

Помимо ВАЦ, висмут способен образовывать неактивные формы, которые проявляются в появлении дополнительных оптических потерь, уровень которых в отличие от активного поглощения практически не меняется при вводе даже большого сигнала (ненасыщаемые потери). Ненасыщаемые потери могут быть вызваны, например, длинными хвостами некоторых полос поглощения, связанных с неактивными центрами (димерами висмута и т.д.) или точечными дефектами, рассеянием из-за неоднородности стекла и несовершенством световедущий структуры. Как сообщалось в Главе 2, эффективным способом получения данных величине активного поглощения И ненасыщаемых потерь является абсорбционная Полученные спектроскопия насыщения. образом зависимости поглощения висмутовых световодов с различным профилем легирования от мощности вводимого излучения показаны на рисунке 3.4.

В каждом случае наблюдается уменьшение поглощения ВАЦ с увеличением используемой мощности после насыщения абсорбционного перехода. Из представленных данных видно, что уровень ненасыщаемых потерь всех исследуемых световодов был достаточно низким: около 4% для образца А и менее 2% для образцов Б и В, что соответствует лучшим световодам, легированным висмутом.

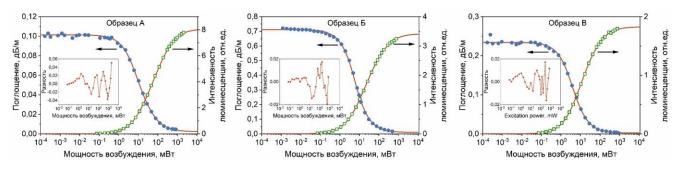


Рисунок 3.4 — Зависимости величины поглощения от мощности сигнала на длине волны 1310 нм (шарики); зависимости интенсивности люминесценции на 1430 нм исследуемых образцов (квадратики) от мощности возбуждающего излучения на длине волны 1310 нм.

Помимо зависимостей насыщения поглощения, показанных на рисунке 3.4, были получены мощностные зависимости насыщения ИК люминесценции для всех исследованных световодов. Для анализа этих данных был выполнен численный расчет для подгонки полученных зависимостей, основанный на решении

дифференциального уравнения, описывающего продольное распространение излучения накачки P(z) в сердцевине активного световода (рисунок 3.4). Снижение интенсивности излучения накачки при распространении вдоль световода, легированного висмутом, обусловлено двумя основными механизмами: поглощением ВАЦ и ненасыщаемыми оптическими потерями. Следовательно, распространение излучения мощности накачки вдоль направления z можно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dP(z)}{dz} = \left(\alpha_0 \frac{\Gamma(P(z))}{\Gamma_0} - \alpha_{BG}\right) \cdot P(z) \tag{3.1}$$

где  $\alpha_{BAII} = \alpha_0 \frac{\Gamma(P(z))}{\Gamma_0}$  поглощение ВАЦ,  $\alpha_{BG}$  — ненасыщаемые потери. Интеграл перекрытия  $\Gamma(z)$ , зависящий от мощности, выражается следующим образом:

$$\Gamma(z) = 2\pi \int_{0}^{\infty} \rho(r) \cdot ((1+\eta) \cdot n(r,z) - 1) \cdot \psi(r) \cdot r dr$$
 (3.2)

здесь  $\alpha_0 = \sigma_a N_0 \Gamma_0$  — активное поглощение слабого сигнала, а  $\Gamma_0 = \frac{2\pi}{A_b} \int_0^\infty \rho(r) \cdot \psi(r) \cdot r dr$  — не зависящий от мощности интеграл перекрытия слабого сигнала. Следует обратить внимание, что при очень малой мощности (режим слабого сигнала) инверсная населенность среды пренебрежимо мала, то есть  $n(r,z) \approx 0$ , следовательно,  $\Gamma(z) \approx -\Gamma_0$ , и уравнение (3.1) упрощается до общей формы:  $\frac{dP}{dz} = -(\alpha_0 + \alpha_{BG}) \cdot P \equiv -\alpha \cdot P$ , что приводит к известному закону Бера–Ламберта–Бугера:  $P(z) = P(0) \cdot e^{-\alpha z}$ . В любом случае общие потери в световоде, как обычно, определяются уравнением:

$$\alpha \left[ \frac{dB}{m} \right] = \frac{10}{L} \cdot \log_{10} \left( \frac{P(0)}{P(L)} \right) \tag{3.3}$$

Интенсивность излучения накачки в произвольной точке световода могла быть вычислена следующим образом:  $I(z,r)=P(z)\cdot \frac{\psi(r)}{\pi r_b^2}\pi r_b^2$ : где  $\pi r_b^2\equiv A_b=2\pi\int_0^\infty \psi(r)rdr$  — эффективная площадь пучка, а  $\psi(r)$  — огибающая (профиль интенсивности) моды (рисунок 3.1 в). Путем интегрирования P(z)=

 $2\pi \int_0^\infty I(z,r) r dr$  по поперечной координате в любой точке z была определена оптическая мощность в этой точке с учетом того, что изменение ее азимутального угла было пренебрежимо малым. Взаимодействие оптического излучения со средой, содержащей ВАЦ, приводило к повышению инверсной населенности с заданным распределением, обусловленным неоднородностью I(z,r). В стационарном состоянии это можно выразить в терминах мощности насыщения  $P_{sat} \equiv \frac{hv}{\tau \cdot \sigma_a \cdot (1+\eta)} \cdot A_b$  следующим образом:

$$n(r,z) = \frac{N_2(r,z)}{N(r)} = \frac{\frac{1}{1+\eta} \frac{P(z)}{P_{sat}} \psi(r)}{1 + \frac{P(z)}{P_{sat}} \psi(r)}$$
(3.4)

где  $\eta \equiv \frac{\sigma_e}{\sigma_a}$ ,  $\tau$  — время жизни метастабильного уровня,  $\sigma_{e,a}$  — поперечное сечение излучения (e) и поглощения (a); —  $N_2(r,z)$  плотность населенности метастабильного уровня, а  $N(r) = N_0 \cdot \rho(r)$ , где  $N_0$  — общая плотность (концентрация) активных центров, а  $\rho(r)$  — профиль легирования, нормированный на 1.

Активная среда при оптическом возбуждении создает люминесцентный сигнал с суммарной мощностью, которая пропорциональна общему числу активных центров на метастабильном уровне:

$$P_{lum} \propto \int_{0}^{L} dz \int_{0}^{\infty} N(r) \cdot n(r, z) \cdot r dr = A \cdot \int_{0}^{L} dz \int_{0}^{\infty} \rho(r) \cdot n(r, z) \cdot r dr \qquad (3.5)$$

где A — константа пропорциональности, учитывающая, в том числе, особенности конкретной экспериментальной установки, используемой для регистрации люминесцентного сигнала, L — длина световода.

Комбинируя уравнения (3.1)—(3.5), интенсивность люминесценции можно представить в виде функции независимой переменной  $P_{sat}$ , которая может быть определена путем подгонки экспериментальных результатов, представлены на рисунке 3.4. Однако столь упрощенная модель не обеспечивала хорошее совпадение расчетов с экспериментальными данными. Было предположено, что

такая ситуация могла возникнуть из-за неоднозначности в определении формы спектров сечений ( $\sigma_{e,a}$ ) ВАЦ-Si, полученных из неоднородно уширенных полос поглощения и люминесценции из-за существования подтипов ВАЦ-Si, как уже выше описывалось.

Чтобы усовершенствовать построенную модель, соответствующие спектры поглощения и люминесценции были разложены на отдельные компоненты в виде функций (рисунок 3.5) каждая из которых соответствовала определенному подтипу ВАЦ-Si. В обоих случаях, т.е. для поглощения и люминесценции в ближнем ИК-диапазоне, хорошее согласование достигалось при использовании трех различных компонент. Следует отметить, что аналогичные результаты для ВАЦ, ассоциированных с кремнием, были достигнуты в [25]. Разумно было предположить, что доминирующая компонента должна быть отнесена к соответствующему ВАЦ-Si, которые вносят значительный вклад в поглощение на 1310 нм и люминесценцию на 1430 нм одновременно. Кроме того, заметное влияние на зависимости насыщения поглощения и люминесценции может оказывать коротковолновая составляющая (для другого подтипа). Поэтому в рассматриваемую модель были введены слагаемые  $\alpha^*$  и  $P_{lum}^*$ : для поглощения  $\alpha^*(P) = \frac{\alpha_0^*}{1 + \frac{P(z)}{P_{cot}^*}}, \ \alpha^{tot}(P) = \alpha^{BAC}(P) + \alpha^*(P) + \alpha_{BG}; \$ и для люминесценции  $P_{lum}^* = \frac{\alpha_0^*}{1 + \frac{P(z)}{P_{cot}^*}}$  $\frac{A^*}{1+\frac{P(z)}{p^*}}$ ,  $P_{lum}^{tot} = P_{lum}^{BAC} + P_{lum}^*$ . В результате расчетные зависимости стали описывать экспериментальные данные (рисунок 3.4). Параметры, используемые для и полученные из расчета, приведены в таблице 3.1. Мощность насыщения  $P_{sat}$  во всех образцах оказалась в пределах 5,5-6,5 мВт, а средние значения сечений поглощения и излучения ВАЦ-Si составляли ~0,62 и ~0,065 пм<sup>2</sup> (на длине волны 1310 нм) с погрешностью 30%, соответственно. В результате проведенных

Используя распределение общей концентрации висмута и концентрации ВАЦ-Si, была оценена эффективность формирования ВАЦ (так называемый

вычислений была определена максимальная абсолютная концентрация ВАЦ-Si,

которая находилась в диапазоне  $\sim (1,5-5,2) \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

коэффициент конверсии), т.е. долю ионов висмута по отношению к общему количеству ионов висмута, принимавших участие в формировании ВАЦ (рисунок 3.1, г). Оказалось, что среднее значение коэффициента конверсии варьируется от 10 до 35 %.

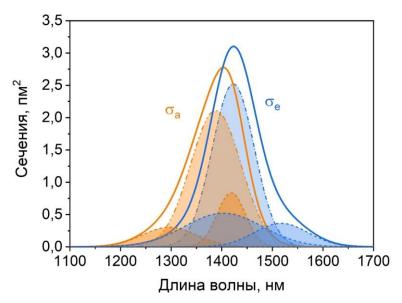


Рисунок 3.5 – Форма спектров сечений поглощения и излучения ВАЦ-Si и их разложения на Гауссовы функции, соответствующие различным подтипам ВАЦ-Si для тестовых световодов (образцы A-B и Б'').

Таблица 3.1 – Параметры, используемые для и полученные из расчета, для G-дизайна световодов.

	Параметры для расчета*		Рассчитанные параметры				
Образец	au, MKC		<i>L</i> , м	$\sigma_a/\sigma_e$ ,	$P_{sat}$ ,	$N_0$ ,	Коэфф.
световода		Потери	Люминесценция	ПМ**	мВт	$10^{17}$	конверсии,
						см <sup>-3</sup>	%
A	640	53	1	0,049/0,46	6,5	1,5	~10
Б	640	30	0,3	0,081/0,78	5,7	5,2	~35
В	640	40	0,5	0,063/0,6	6,3	4,0	~30
Б"	640	_	0,2	0,068/0,64	6,6	3,8	~10

<sup>\*</sup>Со всеми параметрами (кроме образца Б"), используемыми в расчетах, можно ознакомиться из данных, приведенных на представленных графиках и в описании раздела об экспериментальных образцах и методах.

Более того, были получены радиальные распределения данного коэффициента для исследуемых световодов (рисунок 3.6). Видно, что коэффициент

<sup>\*\*</sup>Эти параметры были получены для  $\lambda_p$ , где их отношение составляло примерно 0,1.

конверсии в центральной области (образцы Б и В) достигал около 35%, в то время как коэффициент конверсии в легированном кольцевом слое (образец А) был заметно ниже около 10%. Интересно, что, в отличие от образца А, образец В показал высокий коэффициент конверсии (~ 30%) в периферийной (кольцевой) области, легированной висмутом. Видимо, это объясняется тем, что образец В имел более низкую общую концентрацию ионов висмута по сравнению с образцом А. Таким образом, коэффициент конверсии является концентрационно-зависимым параметром: он уменьшается с увеличением содержания висмута. Это предположение подтверждается данными коэффициента конверсии, полученного для образца Б" с удвоенной по отношению к образцу Б концентрацией ионов висмута в обеих областях сердцевины. В этом случае коэффициент конверсии резко снижался до 10% даже в центральной области (рисунок 3.6).

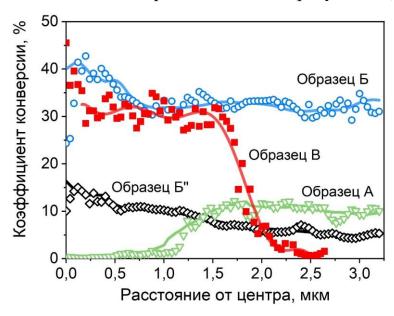


Рисунок 3.6 – Коэффициент конверсии висмута в активные центры в зависимости от радиальной координаты для тестовых световодов (образцы A-B и Б'').

По значениям коэффициента конверсии для разных областей можно сделать вывод, что, кроме содержания ионов висмута, распределение  $GeO_2$  и роль присутствия  $GeO_2$  в стеклянной матрице в целом играют важную роль в наблюдаемых изменениях коэффициента конверсии. В частности, из полученных результатов следует, что коэффициент конверсии значительно снижался, при повышении концентрации висмута и неизменной концентрации  $GeO_2$ . Следует

отметить, что роль оксида германия уже неоднократно обсуждалась в научной литературе, где показано, что доля ионов висмута по отношению к общему числу ионов висмута, участвующих в формировании ВАЦ, может значительно возрастать при добавлении GeO<sub>2</sub> по сравнению со стеклом на основе кварцевого стекла без GeO<sub>2</sub> [98]. Это также согласуется с общей концепцией структуры ВАЦ, которая основана на том факте, что ВАЦ представляет собой комплекс, состоящий из иона висмута в определенном валентном состоянии и кислородно-дефицитного дефекта [48, 99]. Следует отдельно подчеркнуть, что существенных различий в значениях коэффициентов конверсии для приграничных областей и областей вне границ не обнаружено.

## 3.3. Оптическое усиление висмутовых световодов. Лазерные эксперименты с одномодовой накачкой

### W-дизайн

Принимая во внимание полученные параметры световода с W-дизайном, ожидалось получение устройств c улучшенными эксплуатационными характеристиками. С этой целью на основе такого световода длиной 120 метров был реализован висмутовый усилитель с накачкой одномодовым лазерным источником на длине волны 1330 нм. Спектральные зависимости коэффициента усиления и шума слабого сигнала полученного висмутового усилителя для различных мощностей накачки 45, 65 и 85 мВт представлены на рисунке 3.7 (а). Как можно наблюдать, максимальный коэффициент усиления 20 дБ и шум-фактор 5,3 дБ может быть достигнут даже при накачке 45 мВт, что является минимально рекордной для данного типа усилителей. При увеличении мощности накачки с 45 до 85 мВт пиковый коэффициент усиления увеличивался с 22,5 до 29,5 дБ, а коэффициент шума снижался до 4,6 дБ. На рисунке 3.7 (б) показано изменение коэффициента усиления от мощности накачки для различных величин входного сигнала на длине волны 1430 нм. Все полученные зависимости можно

охарактеризовать монотонным ростом коэффициента усиления при увеличении мощности накачки. Для слабого сигнала коэффициент усиления на 1 мВт мощности накачки достигал 0,52 дБ/мВт, тогда как при высокой мощности сигнала (усилитель в режиме насыщения) он снижался до 0,1 дБ/мВт. На рисунке 3.7 (в, г) приведены зависимости коэффициентов усиления от мощности входного и выходного сигнала.

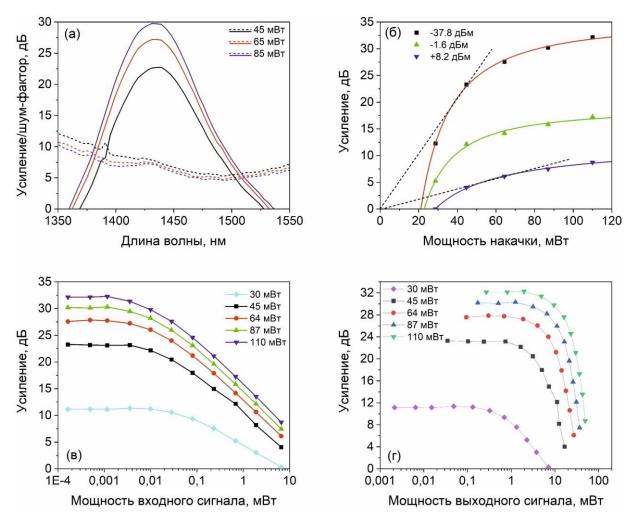


Рисунок 3.7 – а) Спектральные зависимости коэффициента усиления и шума висмутового усилителя на световоде W-дизайна. Длина волны накачки – 1,33 мкм; б) Коэффициент усиления от мощности накачки при различных мощностях входного сигнала на 1430 нм; Зависимости коэффициента усиления от мощности входного (в) и выходного (г) сигнала при различной мощности накачки.

Представленные данные позволяют определить параметры устройства, важные для практического применения в качестве предусилителя или бустера. Видно, что для малых мощностей сигнала усиление оставалась почти постоянным,

однако для больших мощностей входного сигнала наблюдается насыщение усиления. Мощность насыщения входного сигнала варьировалась в диапазоне 0,02-0,07 мВт в зависимости от используемой мощности накачки. Более заметные изменения в мощностях насыщения имели место в аналогичных зависимостях, построенных от выходной мощности сигнала. Как видно на рисунке 3.7 (г), такой усилитель позволяет достичь выходную мощность 1 – 30 мВт, используя всего лишь 30 – 110 мВт мощности накачки.

#### **G**-дизайн

#### Резонансное возбуждение

В отличие от световода W-дизайна, висмутовые световоды G-дизайна имели заметно больший размер сердцевины, а потому, очевидно, не могли конкурировать за более высокий коэффициент усиления, приходящийся на 1 мВт. Однако такие световоды обладали другими преимуществами, а именно рекордно низкими ненасыщаемыми потерями, по сравнению со световодами W-дизайна у которых аналогичный параметр, составлял порядка 3% даже при общем уровне поглощении почти в двое ниже, что подогревало интерес к реализации на их основе волоконных лазеров.

На начальном этапе проводились измерения коэффициента усиления таких световодов. На рисунке 3.8 (а) показаны спектры усиления слабого сигнала висмутовых световодов (образец А и В), полученных при накачке излучением на 1310 нм с мощностью 500 мВт в сердцевину активного световода. Полученные спектры усиления имели близкую к друг другу ассиметричную форму, которая мало отличалась от той, что была получена для световода W-дизайна. Максимум усиления также как ранее рассмотренных случаях приходился на длину волны 1430 нм, что соответствовало ВАЦ-Si. На рисунке 3.8 (б) проведены результаты исследований по изменению спектральной формы коэффициента усиления исследуемых световодов от используемой мощности накачки (для образца В) Видно, что при малых мощностях накачки коэффициент усиления монотонно растет во всей спектральной области, поскольку в таком случае еще не достигнута

максимальная инверсная населенность, тогда как в режиме высоких мощностей накачки какая-либо зависимость отсутствует. В случае отсутствия накачки можно наблюдать типичную полосу поглощения, аналогичную той, которая представлена на рисунке 3.3 (б), где можно заметить небольшой пик при 1380 нм, соответствующий поглощению ОН-групп. Этот пик превращается в провал в спектрах усиления. Из полученных данных проводилась оценка достижения предельно допустимого коэффициента усиления на единицу длины. Для исследуемых образцов данный показатель составлял от 0,1 до примерно 0,45 дБ/м.

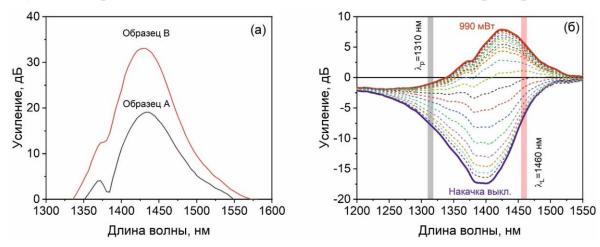


Рисунок 3.8 – а) Спектры усиления висмутовых световодов G-дизайна при одномодовой накачке на 1310 нм с мощностью 500 мВт (Образец А – 200 м; Образец В – 137 м); б) Спектры усиления слабого сигнала 30-м световода (образец В) для различных входных мощностей накачки. Красная полоса обозначает выбранную область, используемую в дальнейших экспериментах для достижения генерации.

Следует отметить, что в коротковолновой области  $\lambda < 1340$  нм в спектрах усиления можно наблюдать широкую полосу, которая почти не зависела от мощности накачки. Принимая во внимание форму этой полосы, можно предположить, что накачка с большими длинами волн может оказаться более эффективной по сравнению с коротковолновой накачкой, что оказалось в последствии подтверждено результатами экспериментов по лазерной генерации.

Проведенные эксперименты показали, что все исследованные образцы могут быть успешно использованы для создания источников непрерывного лазера. В таком случае лазеры работают по квази-трехуровневой схеме, где накачка на 1310 – 1340 нм является резонансной, т.е. возбуждение активных центров

осуществляется непосредственно на метастабильный (лазерный) уровень, с которого переход в основное состояние сопровождается появлением фотона лазерного излучения. Типичные выходные спектры лазерного излучения и детальный вид линий лазерной генерации при различных мощностях лазера ( $P_L$ ) представлены на рисунке 3.9 (а) и (а, вставка), соответственно. Спектры излучения лазеров состояли из узкой линии на длине волны 1461 нм и широкополосного усиленного спонтанного излучения в диапазоне от 1350 до 1550 нм. С увеличением выходного  $P_L$  можно наблюдать следующие изменения: 1) уширение спектральной линии лазерной генерации; 2) смещение в длинноволновую сторону максимума линии лазерной генерации.

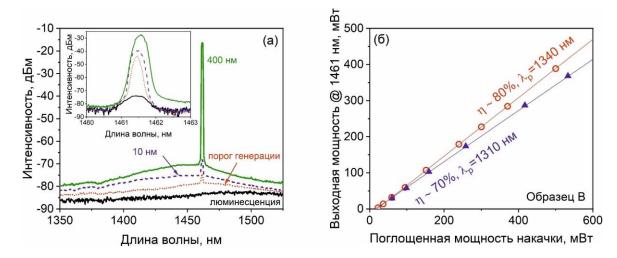
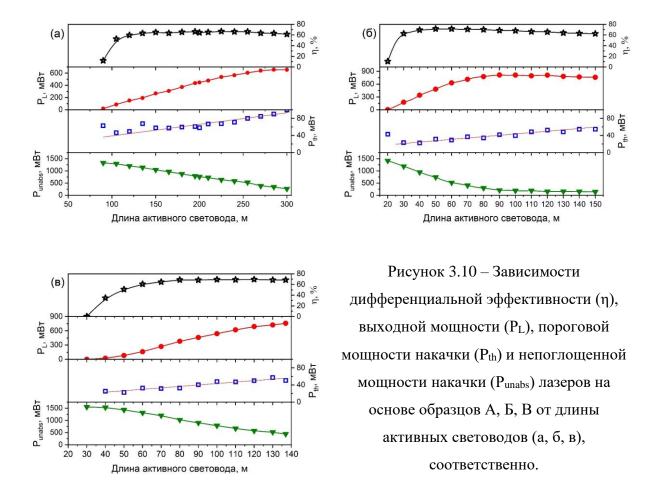


Рисунок 3.9 - a) Типичные спектры выходного излучения висмутового волоконного лазера, работающего на  $\lambda_L \sim 1461$  нм, и подробный вид линий лазерной генерации, измеренной со спектральным разрешением 0.07 нм (врезка) при различной выходной мощности лазера; б) Выходная мощность лазеров (образец B) в зависимости от поглощенной мощности накачки на 1310 нм и 1340 нм.

Такие лазеры демонстрировали стабильную непрерывную работу с высокой дифференциальной эффективностью  $\eta$ . Характерные зависимости выходной мощности лазера  $P_L$  от поглощенной мощности накачки изображены на рисунке 3.9 (б). Можно наблюдать, что  $P_L$  линейно возрастала с увеличением поглощенной мощности накачки  $P_p$ . В результате была достигнута максимальная дифференциальная эффективность 80% по отношению к поглощенной мощности накачки на 1340 нм (для образца B). При использовании длины волны накачки ( $\lambda_p$ )

на длине волны 1310 нм параметры п всех лазеров немного снижались. Этот результат хорошо согласуется с представленными выше данными характеристикам усиления, где была выявлена неизвестная полоса поглощения (рисунок 3.8 (б)). Детальное поведение выходных параметров лазеров, таких как η,  $P_L$ , пороговой мощности накачки  $P_{th}$  и непоглощенной мощности накачки ( $P_{unabs}$ ) на длине 1310 нм в сердцевину активного световода представлено на рисунке 3.10 (а, б, в). Лазерная генерация на образцах Б, В могла быть достигнута даже при использовании отрезка длиной 20-30 м, тогда как в случае образца А для достижения генерации необходимо было использовать почти вдвое более длинный сегмент активного световода. Все лазеры характеризовались  $\eta \sim 60-80\%$  и относительно низким P<sub>th</sub>, который варьировался в диапазоне 20 – 100 мВт. Пороговая мощность накачки линейно возрастала в зависимости от длины используемого световода. Кроме того, исследованные лазеры были способны работать без существенного снижения (в диапазоне  $\pm 10\%$ ) параметра  $\eta$  для всех используемых длин активного световода, т.е. достигалось насыщения для световодов длиной более 50-60 м. В то же время максимальная P<sub>L</sub> была получена при минимальном  $P_{unabs}$ , что видно из зависимостей для  $P_L$  и  $P_{unabs}$  (рисунок 3.10). Как было представлено выше, максимальная дифференциальная эффективность лазеров была достигнута для образца В, где распределение активных ионов в центральной части сердцевины обеспечивает улучшенное взаимодействие накачки легирующей активной добавки за счет соответствующего фундаментальной моды и распределения ВАЦ-Si. Таким образом, легирующий профиль для этого типа активных световодов способствует эффективному использованию энергию накачки. Аналогичным образом можно объяснить снижение у лазера для образца А с кольцевым легированием висмута, т.е. из-за снижения интенсивности излучения накачки в приграничной с оболочкой области. Кроме того, в таком случае не следует исключать негативные эффекты кластеризации, особенно на границе раздела вблизи сердцевины и оболочки. Однако мы предполагаем, что последний эффект может быть незначителен из-за интенсивности фундаментальной моды в пограничной области сердцевины и оболочки.



#### Нерезонансное возбуждение

На следующем этапе исследований внимание было сосредоточено на использовании нерезонансной накачки для возбуждения ВАЦ-Si с целью получения информации об усилительных и лазерных свойствах (см. диаграмму энергетических уровней ВАЦ рисунок 3.11 (а)). Известно, что в спектрах поглощения германосиликатных световодов с висмутом помимо основной полосы на 1400 нм, наблюдается коротковолновая полоса на длине волны 825 нм. Используя коммерчески доступный одномодовый ЛД, работающий на длине волны 808 нм, был измерен спектр усиления при возбуждении в данную полосу поглощения (образец Б). На рисунке 3.11 (б) представлен полученный спектр усиления. Видно, что оптическое усиление достигается во всем указанном

диапазоне длин волн 1300 — 1550 нм. Максимум усиления 0,2 дБ/м, также, как и в случае резонансной накачки достигался на длине волны 1430 нм. Полученная информация об усилении свидетельствовала о возможности достижения лазерной генерации, что было успешно продемонстрировано на следующем этапе, где был создан висмутовый лазер, состоящий из активного световода длиной 17 м и пары ВБР с коэффициентом отражения 50% и ≈100% на длине волны 1461 нм. Длина висмутового световода выбиралась таким образом, чтобы уровень инверсии населенностей был достаточно высоким, чтобы обеспечить усиление по всей длине световода, которое определялось уровнем непоглощенной мощности накачки >30 мВт. Зависимость выходной мощности висмутового лазера от входной мощности накачки на 808 нм представлена на рисунке 3.11 (в). Порог генерации составлял 35 мВт от мощности накачки, а максимальная достигаемая выходная мощность — 1,7 мВт. Дифференциальная эффективность висмутового лазера была близка к 1%.

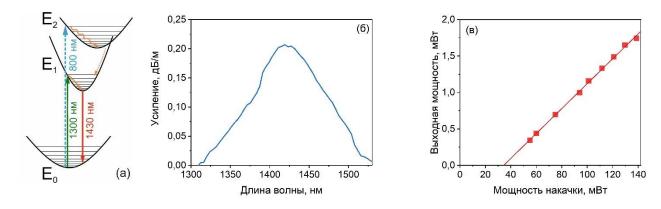


Рисунок 3.11 - a) Энергетические переходы, ответственные за возбуждение ВАЦ на метастабильный уровень  $E_1$  через промежуточный уровень  $E_2$ , и лазерный переход  $E_1 \rightarrow E_0$ . б) Спектр усиления исследуемого световода с накачкой в сердцевину одномодовым ЛД на длине волны 808 нм с мощностью 150 мВт; в) Выходная мощность висмутового лазера на 1460 нм от введенной мощности накачки

Низкая эффективность была обусловлена рядом причин, которые будут обсуждены при анализе характеристик висмутовых лазеров, накачиваемых многомодовым излучением на длине волны 808 нм (Глава 5). Фактически достижение генерации в исследуемом световоде указывало на то, что

разработанная активная среда способна усиливать по трехуровневой схеме, т.е. явилось первым шагом на пути к лазерам с накачкой в оболочке.

#### 3.4. Выводы к Главе

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1) Предложены И разработаны сердцевиной световоды ИЗ германосиликатного стекла, легированного висмутом, с G-дизайном. Проведено всестороннее исследование серии одномодовых световодов, легированных висмутом, и различным радиальным распределением легирующих (активных и неактивных) добавок. Получены зависимости радиального распределения легирующих добавок (Ge, F) в преформах и одномодовых световодах, из которых сделан вывод о диффузионных процессах в исследованных образцах. С помощью ВРМ была измерена общая концентрация ионов висмута по поперечному сечению заготовок световодов, которая не превышала  $\sim 1,6\times 10^{18}$  см<sup>-3</sup> во всех образцах. Используя спектроскопию насыщения поглощения и люминесценции, а также численное моделирование, была оценена концентрация ВАЦ, которая составляла  $(1,5-5,2)\times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Впервые получена зависимость коэффициента конверсии ионов висмута в ВАЦ (Ві ВАЦ) для германосиликатных светодов с различным радиальным распределением висмута и оксида германия. Установлено, что эффективность преобразования (коэффициент конверсии) Ві→ВАЦ составляет от 10 до 35%. Анализ полученных данных позволил сделать вывод о том, что помимо содержания ионов висмута существенную роль в наблюдаемых изменениях коэффициента конверсии Ві→ВАЦ оказывает концентрация GeO<sub>2</sub> и его радиальное распределение. В частности, из полученных результатов следует, что существуют предельные концентрации висмута для определенного содержания GeO<sub>2</sub>, выше которых коэффициент конверсии начинает существенно снижаться. Было определено, что выходные характеристики лазеров для всех исследуемых

световодов были сравнимы даже несмотря на то, что они характеризовались разными коэффициентами конверсии. Таким образом, 65 – 90% ионов висмута в неактивной форме не оказывали существенного влияния на усилительные и лазерные характеристики световодов такого типа. На основе разработанных световодов были реализованы лазеры с рекордными значениями дифференциальной эффективности ~80% от поглощенной мощности накачки.

2) Разработаны висмутовые световоды W-дизайна, на основе которых был создан, в том числе, волоконно-оптический усилитель, обеспечивающий усиление >20 дБ и коэффициент шума 5,3 дБ при рекордно-минимальной используемой мощности накачки 45 мВт. Данный световод обладает лучшей эффективностью усиления 0,52 дБ/мВт среди разработанных висмутсодержащих материалов.

Глава 4 Висмутовые  $P_2O_5$ — $SiO_2$  световоды для О-диапазона (1260 — 1360 нм) с депрессированной оболочкой (W-дизайн) и пьедесталом

Основные результаты данной главы опубликованы в работах [100, 101, 102, 103, 104, 105].

В данной главе будут рассмотрены свойства висмутовых световодов, сердцевина которых была изготовлена из фосфоросиликатного стекла, легированного висмутом. В рамках данного исследования будут обсуждаться характеристики световодов с W-дизайном и пьедестальным ППП.

## 4.1. Оптические свойства висмутовых $P_2O_5$ — $SiO_2$ световодов: с пьедесталом и W-дизайном

Сразу хотелось бы отметить, что волоконные световоды с сердцевиной из P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub> стекла с висмутом, обладают широким спектром ИК люминесценции достаточно сложной структуры. Как ранее было установлено, это частично обусловлено сосуществованием нескольких типов висмутовых активных центров, а именно ВАЦ-Р и ВАЦ-Si, полосы люминесценции которых значительно перекрываются, позволяя потенциально получить широкий контур люминесценции. Важной задачей в таком случае является поиск эффективных способов для получения определенного количества различных типов ВАЦ и управления их соотношением. Очевидным подходом для достижения этого является вариация химического состава стеклянной матрицы путем добавления легирующих добавок. Как оказалось, данный подход обладал рядом критических В частности, в случае с фосфоросиликатной сердцевиной, требовалось использовать достаточно низкие концентрации  $P_2O_5$  для достижения желаемых оптических свойств, что приводило к нарушению световедущих свойств структуры. Введение дополнительных легирующих примесей в такое стекло отрицательно сказывалось на оптических свойствах ВАЦ.

Поэтому в качестве приоритетного рассматривался подход, основанный на изменении химического состава стекла оболочки, прилегающей к сердцевине, легированной висмутом. Это позволяло обеспечить широкое варьирование концентраций оксида фосфора (вплоть до того, что показатель преломления сердцевины очень близок к показателю преломления SiO<sub>2</sub>) при сохранении световедущей структуры из-за наличия депрессированной оболочки вокруг легированной висмутом сердцевины (W-дизайн). В результате была реализована серия волоконных световодов W-дизайна, информация о которых представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 –Параметры висмутовых фосфосиликатных световодов W-дизайна

Образец	Химический состав стекла		Содержание	$\Delta N \times 10^{-3}$
световода	сердцевины, ат.%		фтора в	
	Фосфор	Фтор (за счет	оболочке, ат.%	
		диффузии)		
1	0,6	0,16	1,75	7,5
2	1,5	<0,1	1,75	9,5
3	2	<0,1	1,75	11,5
4	3,8	<0,1	1,75	14

Люминесцентные и абсорбционные характеристики полученных световодов показаны на рисунке 4.1, также, как и соответствующие ППП. Видно, что изменение содержания  $P_2O_5$  оказывало сильное влияние на свойства висмутовых световодов такого типа (рисунок 4.1, а и с). Для наглядности и ясного понимания причин изменения форм спектров поглощения и люминесценции на графиках показаны полосы, относящиеся к ВАЦ-Si и ВАЦ-P. Полученные результаты свидетельствуют о том, что снижение количества оксида фосфора приводит к увеличению количества ВАЦ-Si и ВАЦ-P и их соотношения. Следует отметить тот факт, что даже 3,8 ат.% фосфора в сердцевине световода достаточно для

достижения значительного превышения содержания ВАЦ-Р над содержанием ВАЦ-Si.

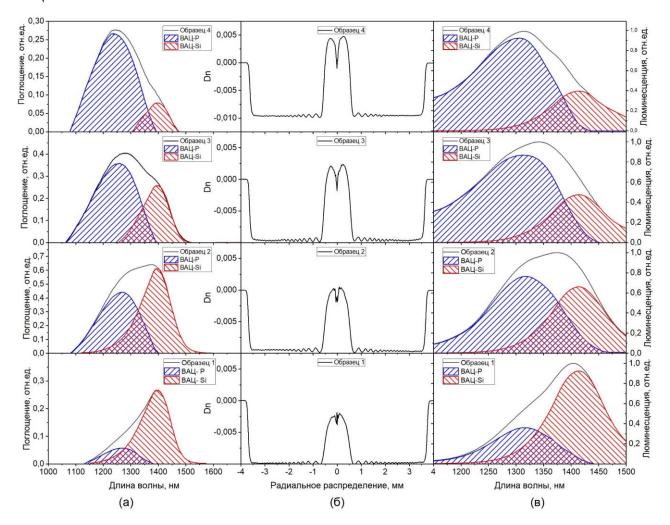


Рисунок 4.1 – (а) Спектры поглощения висмутовых световодов с сердцевиной из фосфоросиликатного стекла W-дизайна; (б) ППП заготовок исследуемых световодов; (в) Спектры люминесценции исследуемых световодов при возбуждении на длине волны 808 нм.

Как можно видеть, по мере уменьшения концентрации фосфора вклад ВАЦ-Р в абсорбционные и люминесцентные свойства меняется с доминирующего на незначительный и наоборот. Таким образом можно добиться определенного соотношения между содержанием ВАЦ-Р и ВАЦ-Si, что даст хорошую возможность объединить рабочие диапазоны длин волн ВАЦ-Р и ВАЦ-Si из-за перекрытия полос усиления соответствующих ВАЦ, и получить активные среды с почти удвоенной по ширине полосой усиления (рисунок 4.2).

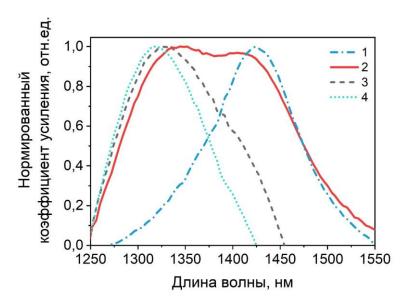


Рисунок 4.2 — Нормированные спектры усиления исследованных световодов, полученные при накачке при 1230 нм.

### 4.2. Фото- и термоиндуцированные эффекты

Систематическое исследование процесса обесцвечивания активных центров при воздействии лазерного света и тепловой обработки является важной составляющей для получения новых знаний об их физической природе. В данной работе исследования были направлены на изучение таких процессов применительно к ВАЦ-Р.

#### Экспериментальная часть

Процесс обесцвечивания ВАЦ можно явно наблюдать по изменению интенсивности люминесценции висмутового световода при воздействии лазерного излучения. Типичные спектры люминесценции световода с сердцевиной из фосфоросиликатного стекла, легированного висмутом, облученного излучением на длине волны 532 нм при различной длительности: 0 с; 20 с и 100 с. В данном случае исходной световод был нагрет до 500 °С, чтобы данный процесс привел к заметным изменениям за выбранные временные интервалы. В спектре люминесценции исходного световода можно наблюдать основной пик на 1,31 мкм, принадлежащий

ВАЦ-Р, а также небольшое плечо около 1,43 мкм, принадлежащее ВАЦ-Si. Следует отметить, процесс облучения не приводил к изменению формы спектров. После 1000 с интенсивность люминесценции снижалась более чем в 10 раз, что принималось за полную деградацию люминесцентных свойств световода.

На рисунке 4.3 представлены спектры поглощения исследуемых световодов до и после обработки (облучение на 532 нм и Т=500 °С) в диапазоне длин волн 390 − 850 нм. Произведенная обработка также привела к полному обесцвечиванию наблюдаемых полос 450 и 750 нм. После обесцвечивания можно было наблюдать только остаточные потери, которые монотонно уменьшались с увеличением длины волны.

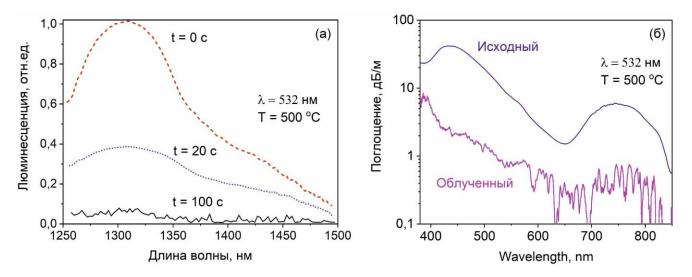


Рисунок 4.3 – (а) Спектры люминесценции висмутового фосфоросиликатного световода, нагретового до 500 С, после облучения излучением на 532 нм в течение 0, 20 и 1000 сек; (б) Спектры поглощения исходного и облученного световодов (при температуре 500 С).

Динамику разрушения ВАЦ-Р можно проследить на рисунке 4.4 (а), где представлена временная эволюция их концентрации в нагретых до разных температур висмутовых световодах, подвергшихся воздействию излучением на длине волны 532 нм. Как и ожидалось, скорость разрушения ВАЦ-Р возрастала с повышением температуры. Видно, что при 500 °С происходит полное разрушение ВАЦ-Р, индуцированное излучением на 532 нм за ≈1000 с. В то же время при Т=300 °С содержание ВАЦ изменялось всего на 25-30%. Чтобы инициировать обесцвечивание под воздействием ИК излучения (на длине волны 1,24 мкм), было необходимо увеличить температуру и время мониторинга (рисунок 4.4, б), что

связано со значительно более низкой скоростью протекающей реакции, чем для излучения на 532 нм. Тем не менее полная деструкция ВАЦ достиглась за  $\approx 2$  часа при T = 600 °C. Важно отметить, что наблюдаемые изменения люминесцентных и абсорбционных свойств фосфоросиликатных световодов, легированных Ві, оставались неизменными, т.е. восстановления свойств после охлаждения не происходило, как косвенно видно из графика на рисунке 4.4 (б), который представляет собой временную зависимость изменения интенсивности люминесценции при совместном воздействии температуры и излучения накачки (области I и III). Область II представляет собой промежуточную стадию, где обработка. Как термическая онжом наблюдать, только восстановление ВАЦ за t > 1 час составляет 10-15% при T=500 °C. Таким образом, скорость процесса восстановления в этом типе световодов более чем на порядок медленнее, чем скорость процесса разрушения.

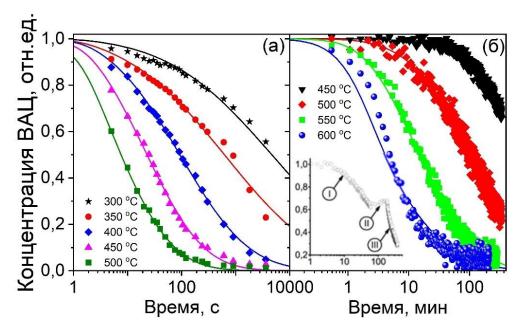


Рисунок 4.4 — Временные изменения относительной концентрации ВАЦ-Р в световоде, подвергнутом облучению излучением на длине волны 532 нм (а) и 1240 нм (б) при нагреве до разных температур (символы — экспериментальные данные; линии — моделирование). Вставка: Эволюция интенсивности люминесценции ВАЦ-Р в световоде, нагретом до 500 °C с (области I и III) и без (область II) облучения.

#### Модель

Для описания наблюдаемого явления была предложена феноменологическая модель, принцип которой схематически объясняется на рисунке 4.5. Модель основана на ряде допущений (предположений): і) центры фотообесцвечивания могут существовать в нескольких различных состояниях: 0 (основной), 1 (возбужденный) и 2 (неактивный), характеризующийся плотностью заселенности N0, N1 и N2, соответственно; іі) ВАЦ в основном состоянии термически стабильны и могут поглощать оптические фотоны с переходом в возбужденное состояние, при котором происходит термохимическая реакция превращения в неактивное состояние; ііі) кроме того, обесцвеченные центры в возбужденном состоянии могут переходить в основное состояние с испусканием фотона или без.

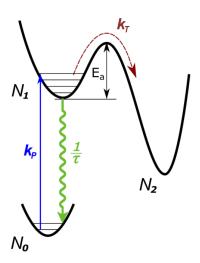


Рисунок 4.5 – Предлагаемая схема уровней, показывающая поглощение/релаксацию и химическую реакцию первого порядка с константами скоростей взаимного преобразования между состояниями.

При качественной оценке природы центров обесцвечивания нет необходимости ограничиваться исключительно ВАЦ. Структурные элементы стеклянной сетки, которые могут участвовать в формировании ВАЦ или сосуществовании с ВАЦ, находящееся вблизи них, могут также рассматриваться как центры обесцвечивания. В таком случае разрушение центра обесцвечивания приводит к модификации ВАЦ, что в экспериментах отражается в уменьшении интенсивности люминесценции. Согласно предложенной модели, временная эволюция содержания центров обесцвечивания при совместном действии

лазерного излучения и термической обработки описывается набором дифференциальных уравнений, описывающих динамику плотности заселенности основного  $(N_0)$ , возбужденного  $(N_1)$  и неактивного  $(N_2)$  состояний:

$$\frac{dN_0(t)}{dt} = -k_P N_0(t) + \frac{1}{\tau} N_1(t) 
\frac{dN_1(t)}{dt} = -k_T N_1(t) + k_P N_0(t) - \frac{1}{\tau} N_1(t) 
\frac{dN_2(t)}{dt} = k_T N_1(t)$$
(4.1)

где коэффициенты  $k_P$ ,  $k_T$  характеризуют скорость накачки и скорость термически активированного процесса, приводящего к разрушению центров, соответственно,  $\tau$  — постоянная времени с учетом радиационной и безызлучательной релаксации центра в основное состояние. Скорость  $k_T$  процесса можно представить в виде уравнения Аррениуса:

$$k_T = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \tag{4.2}$$

где,  $k_0$  — предэкспоненциальный фактор,  $E_a$  — энергия активации,  $k_B$  — постоянная Больцмана, T — температура.

Следует отметить, что уравнение (4.1) не учитывает возможный обратный процесс(ы) формирования ВАЦ из неактивных форм, то есть термоактивационный процесс считается необратимым. Поэтому уравнение (4.1) можно преобразовать в уравнение второго порядка относительно  $N_1$ :

$$\frac{d^2N_1}{dt^2} + \left(\frac{1}{\tau} + k_P + k_T\right) \frac{dN_1}{dt} + k_P k_T N_1 = 0 \tag{4.3}$$

имеющее аналитическое решение:

$$n(t) = \frac{N(t)}{N(0)} = \left[ \frac{1+\alpha}{2\alpha} e^{-(1-\alpha)Rt} - \frac{1-\alpha}{2\alpha} e^{-(1+\alpha)RT} \right]$$
(4.4)

где  $N(t)=N_0(t)+N_1(t)$  общая концентрация центров;  $R=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\tau}+k_P+K_T\right)$ , и  $\alpha=\sqrt{1-\frac{k_Tk_P}{R^2}}$ . Поскольку стекло имеет аморфную структуру, ожидается, что в матрице

стекла могут существовать различные конфигурации центров обесцвечивания из-

за различия в их локальном окружении. Следовательно, для анализа процессов в активной среде необходимо использовать некоторое распределение энергии активации  $E_a$ , описываемое функцией плотности вероятности  $g(E_a)$  с начальной концентрацией подмножества центров, имеющих энергию активации в диапазоне от  $E_a$  до  $E_a+dE_a$  равно  $N_{\rm ucx.}\cdot g(E_a)\cdot dE_a$ , где  $N_{\rm ucx.}-$  начальная концентрация центров обесцвечивания во всех подмножествах [106]. Предполагая, что каждое подмножество центров обесцвечивания изменяется независимо согласно системе уравнений (4.1), то суммарная концентрация обесцвеченных центров может быть вычислена:

$$N(t,T) = N_{\text{\tiny HCX.}} \int_0^\infty g(E_a) \cdot n(t,T,E_a) dE_a \tag{4.5}$$

где  $n(t, T, E_a)$  взято из уравнения (4.4). Для описания экспериментальных данных было выполнено численное интегрирование уравнения (4.5) в приближении, что распределение  $g(E_a)$  можно представить в виде функции Гаусса:

$$g(E_a) = \frac{2}{\Delta E_a} \left(\frac{\ln 2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-4\ln 2\left(\frac{E_a - \langle E_a \rangle}{\Delta E_a}\right)^2},$$
 (4.6)

где средняя энергия активации  $\langle E_a \rangle$  и полная ширина на половине высоты (FWHM) распределения  $\Delta E_a$  используются в качестве варьируемых параметров для подгонки модели к экспериментальным данным. На рисунках 4.4 и 4.6 видно, что расчетные зависимости, изображенные пунктирными линиями достаточно хорошо описывают экспериментальные данные, представлены символами. Параметры, используемые для подгонки, приведены в таблице 4.2. Как видно, полученные константы скорости и активации энергии заметно различаются для экспериментов с лазерным излучением на длине волны 532 и 1240 нм.

Уравнение (4.3) можно значительно упростить, если принять во внимание, что скорости оптического процессов  $k_p$  и  $\tau_I$  значительно превышают скорость теплового процесса  $k_T$ . В этом случае для нахождения распределения энергии активации химических процессов из экспериментальных данных можно использовать "master curve" подход [107], который основан на построении

комплексной эталонной кривой путем преобразования экспериментальных данных N(t,T) для разных температур, выраженные по одному параметру, так называемому энергия демаркации  $E_d=k_BT\ln k_0t$ :  $N(t,T)\to N(E_d)=N(E_d(t,T))$ .

Таблица 4.2 – Параметры, используемые и полученные в расчете.

Параметры	Обозначение	Значения				
Фиксированные параметры						
Время жизни, мс	τ	1				
Скорость накачки, с-1	$k_P$	$10^{4}$				
Параметры для обесцвечивания на длине волны 532 нм						
Предэспоненциальный фактор, с-1	$k_0$	$(6,26\pm0,02)\cdot10^6$				
Энергия активации, эВ	$\langle E_a \rangle$	$1,21 \pm 0,03$				
Среднеквадратичное отклонение, эВ	$\Delta E_a$	$0,\!45\pm0,\!14$				
Параметры для обесцвечивания на длине волны 1240 нм						
Предэспоненциальный фактор, с-1	$k_0$	$(6,27\pm0,01)\cdot10^{10}$				
Энергия активации, эВ	$\langle E_a \rangle$	$1,98 \pm 0,01$				
Среднеквадратичное отклонение, эВ	$\Delta E_a$	$0,\!28 \pm 0,\!19$				

Таким образом, полученная кривая представляет собой зависимость эволюции концентрации центров от энергии демаркации. Таким образом были определены распределение энергии активации, изображенные на рисунке 4.6, для ВАЦ, подвергнутых лазерному облучению на длине волны 532 и 1240 нм. Полученное распределение  $g(E_a)$  при облучении на длине волны 532 нм состоит из основного пика расположен при 1,24 эВ и имеет заметное плечо в области низких энергий (около 1 эВ). В то же время распределение  $g(E_a)$ экспериментов с лазерным излучением на длине волны 1240 нм характеризуется единственным пиком в области энергии 1,98 эВ. Полученные данные показывают достаточно хорошее согласование расчетных данных с экспериментальными для случая с излучением на 1240 нм. Однако для 532 нм наблюдается явное расхождение форм распределений. Это несоответствие можно объяснить сосуществованием двух подпроцессов, протекающих частично

перекрывающихся температурных диапазонах. В частности, наличие дополнительного пика можно интерпретировать как результат фото- и термоиндуцированных процессов ВАЦ-Si, характеризующиеся средней энергией активации 1 эВ [58].

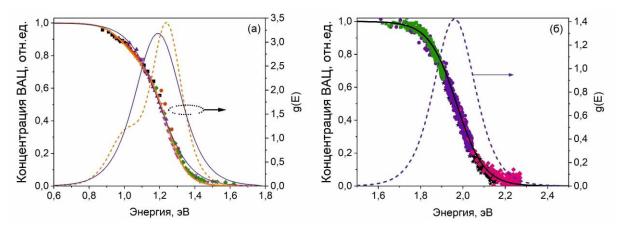


Рисунок 4.6 — Зависимости изменения концентрации ВАЦ от энергии и распределение энергии активации g(E) процессов, инициируемых лазерным излучением на длинах волн 532 нм (a) и 1240 нм (б). Символы — экспериментальные данные, линии — соответствие теоретической модели экспериментальным данным.  $\kappa_0$  составляет  $4\times10^6$  и  $5\times10^{10}$  с<sup>-1</sup> для (a) и (б) соответственно.

Кроме того, был выполнен сравнительный анализ скоростей протекания процессов фотообесцвечивания ВАЦ-Р при воздействии излучения на 1240 нм в висмутовых световодах различного дизайна, в частности, W-дизайн, световод со ступенчатым ППП и «Панда». Профили показателя преломления преформ исследуемых световодов представлены на рисунке 4.7 (а). Полученные результаты, представлены в виде изменения зависимости интенсивности люминесценции, в разных типах световодов показаны на рисунке 4.7 (б). Видно, что облучение нагретого до 500 °C световода W-дизайна приводило к существенному (необратимому) снижению интенсивности люминесценции ВАЦ-Р. И примерно через 100 мин облучения остаточный уровень люминесценции ВАЦ-Р составлял примерно половину от исходного, тогда как для световодов с ступенчатым ППП и «Панда», в аналогичных условиях, изменения интенсивности люминесценции не превышали 10%, за указанный промежуток времени.

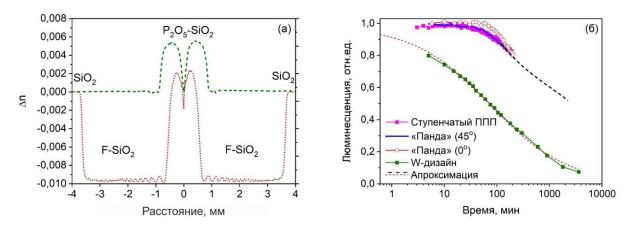


Рисунок 4.7 – а) ППП преформы стандартного дизайна и W-дизайна; б) изменение интенсивности люминесценции на длине волны 1.33 мкм для висмутовых световодов: стандртный световод со ступенчатым ППП, «Панда» и W-дизайн. Облучение проводилось лазерным излучением на длине волны 1240 нм при температуре 500 °C.

#### Интерпретация

Хотя феноменологическая модель приемлемо описывает экспериментальные результаты и может быть полезной для грубой оценки ряда параметров, предложенная модель все еще остается лишь упрощением реальной ситуации, которой недостаточно для полноценного описания всех особенностей поведения процесса обесцвечивания из-за отсутствия всеобъемлющих знаний о структуре ВАЦ, сосуществовании различных форм Ві и точечных дефектов в сетке стекле, а также недостаточного понимания влияние локального окружения на физикохимические свойства ВАЦ. Что касается механизма обесцвечивания, то можно с уверенностью предположить, что необходимость создания высокотемпературных условий исключает такой процесс, как прямая ионизация активных ионов. Кроме того, процесс обесцвечивания ВАЦ-Р активируется при оптической накачке в полосу поглощения на 1240 нм, принадлежащую ВАЦ-Р, а также в полосу на 532 нм, где нет поглощения ВАЦ-Р. Поэтому, предполагается, что оптическое излучение на длине волны 532 нм воздействует не на ВАЦ, а другую структуру, так называемый центр обесцвечивания, расположенный в непосредственной близости к ВАЦ. Преобразование данной структуры посредством процессов, изображенных на рисунке 4.5, вызывает некоторые структурные трансформации, приводящие в

итоге к разрушению ВАЦ-Р. Подобная ситуация была обнаружена для висмутовых световодов с высоким содержанием GeO<sub>2</sub>, где ВАЦ-Ge ассоциировался с ODC(II), кислородно-дефицитным центром который деградировал воздействием лазерного излучения на длине волны 532 нм, что приводило к исчезновению ВАЦ-Ge. При воздействии оптического излучения на 1240 нм, также нельзя исключать, что аналогичная структура может быть задействована в процессе обесцвечивания ВАЦ посредством многофотонного процесса, который в принципе может происходить в этих типах световодов при заданной интенсивности [108]. Наблюдаемое различие в энергии активации, вероятно, можно объяснить изменением характера взаимодействия между центрами обесцвечивания и ВАЦ-Р, которые, в отличие от накачки с длиной волны 532 нм, также могут переходить в возбужденное состояние при оптической накачке на длине волны 1240 нм. При обсуждении возможных особенностей строения стеклянной матрицы, в результате которых могут формироваться центры обесцвечивания, следует, прежде всего, учитывать процессы дефектообразования, возникающие в фосфоросиликатном стекле. Поскольку фосфор имеет степень окисления 5+, то его внедрение в матрицу кварцевого стекла приведет к заметным структурным перестройкам образованием ряда точечных дефектов помимо тех, что свойственны для кварцевого стекла. Так, например, в фосфоросиликатных стеклах могут Р-ассоциированные существовать комплексы, именно четырехкоординированные ионы  $P^{3+}$  с захваченной дыркой и/или электроном РОНС (электрон, общий между двумя немостиковыми атомами кислорода четырехкоординированного атома Р) [109]. Однако ЭТИ дефекты рассматривать как потенциальные центры обесцвечивания, поскольку они преимущественно возникают только при у-облучении. Помимо вышеупомянутых дефектов, детальное теоретическое и экспериментальное изучение структурных особенностей этой стеклянной матрицы, выполненное рядом научных групп, показало существование иных дефектов, связанных с Р, в частности, Р-связанный ODC(I), представляющий собой трехкоординированный атом Р ([(O=)3P:]), РОDС(II) и SiE'(P)-центр (Атом Р вокруг центра SiE') [110]. Также следует исключить из рассмотрения SiE'(P)-центры и PODC(I) из-за существенного различия в температурном поведении этих центров и полученных в данной работе экспериментальных данных. PODC(II), трехкоординированный атом P, соседний с SiODC(II) [111], с широкой полосой УФ-поглощения при 6,9 эВ (названная по аналогии с Р-родственным Е'-центром) с образованием слабой ковалентной связи между атомами Р и Si, еще недостаточно изучена. Однако этот дефект может рассматривается как потенциальный кандидат, способствующий формированию ВАЦ-Р с учетом сходство с ВАЦ-Ge и ВАЦ-Si. Однако он также, по-видимому, не принимает участие в процессе фотообесцвечивания из-за существенного несоответствия энергий фотонов используемого оптического излучения и энергией полосы поглощения PODC(II), которая расположена примерно на 4,5-5 эВ [112]. Далее рассматривая возможные центры обесцвечивания, следует отметить, что сетка такого стекла главным образом состоит из случайно распределенных тетраэдров SiO<sub>4</sub> и O=PO<sub>3</sub>, соединенных друг с другом, образуя структурные единицы, в частности, трех- и пятикоординированные атомы Р (О=Р(О-Si)<sub>3</sub> и Р-(О-Si)<sub>5</sub>). В работе [113] с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния и численного расчета было показано, что УФ-излучение в фосфоросиликатном стекле способно инициировать превращение структурных центров O=P(O-Si)<sub>3</sub> в центры P-(O-Si)<sub>5</sub>. В этом случае происходило снижение интенсивности полосы поглощения 4,7 эВ (265 нм) под воздействием УФ-излучения. Выяснилось, что аналогичная полоса имеется в спектре возбуждения люминесценции ВАЦ-Р, как показано в [46]. Вероятно, в таком случае может происходить процесс безызлучательной передачи энергии возбуждения между центром ВАЦ-Р и О=Р(О- $Si)_3$ . Подобные ситуации неоднократно предлагались И находили экспериментальное подтверждение в различных работах для активных ионов и дефектов сетки стекла, например [114, 115], где полоса при 244 нм, принадлежащая кислородно-дефицитному центру ODC(II), появлялась в спектре возбуждения люминесценции Yb<sup>3+</sup>. Таким образом, несмотря на получение экспериментальных данных по фотообесцвечиванию ВАЦ, которые проливают свет на природу физико-химических процессов в легированном Ві фосфоросиликатном стекле,

понимание этого процесса, с точки зрения происходящих механизмов на атомарном уровне в стекле, остается проблемой для дальнейших исследований.

#### Фотообесцвечивание ВАЦ-Si

Как выше было показано, что в фосфоросиликатных световодах, помимо ВАЦ-Р, присутствуют ВАЦ-Si, которые также под воздействием видимого излучения ΜΟΓΥΤ разрушаться. Подобный процесс уже наблюдался высокогерманатных световодах с висмутом [54, 116, 117]. В данном разделе хотелось бы кратко обсудить различия параметров процесса фотообесцвечивания ВАЦ-Si, формирующихся в разных стеклянных матрицах, на примере их сравнительного анализа. Для этого были проведены эксперименты по облучению фосфоросиликатных типов (германо-, И высокогерманатных) различных висмутовых световодов, в которых присутствуют ВАЦ-Si. На рисунке 4.8 (a) показаны спектры поглощения, состоящие из характерных полос ВАЦ-Ge и ВАЦ-Si, исходного и облученного синим излучением световода с сердцевиной из высокогерманатного стекла, легированного висмутом. Видно, что после облучения в течение 3 часов происходит почти полное исчезновение полос поглощения как ВАЦ-Ge, так и ВАЦ-Si. Полученные данные согласуются с опубликованными данными в различных работах [58, 112]. На рисунке 4.8 (б) показана динамика изменения интенсивности полосы ИК люминесценции ВАЦ-Si в различных стеклянных матрицах в процессе облучения излучением на длине волны 450 нм. Видно, что процесс деградации происходит по-разному, наиболее интенсивно для германосиликатного стекла и достаточно слабо для фосфоросиликатного стекла. Таким образом, экспериментальным образом показано, что интенсивность процесса разрушения ВАЦ-Si в сильной степени зависит от химического состава стеклянной обусловлено матрицы. Это, по-видимому, структурными особенностями стеклянной матрицы, которые возникают в окрестности или являются неотъемлемой частью ВАЦ. Полученные данные согласуются с тем, что было получено для ВАЦ-Р, где процесс фотообесцвечивания был ассоциирован со структурными центрами O=P(O-Si)<sub>3</sub>, как было описано выше.

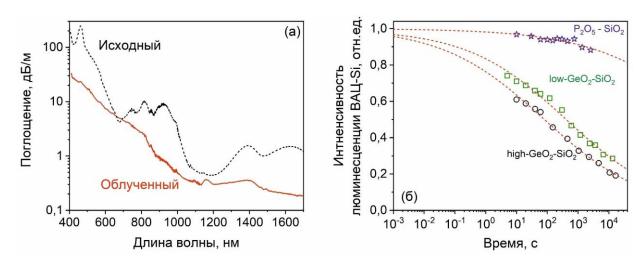


Рисунок 4.8 - a) Спектры поглощения исходного и облученного висмутового световода с сердцевиной из германосиликатного стекла; б) Эволюция интенсивности характерных полос ИК люминесценции ВАЦ-Si в висмутовых световодах с сердцевиной из германо- (low-GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>), фосфоросиликатного ( $P_2O_5$  - SiO<sub>2</sub>) и высокогерманатного стекла (high-GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>).

#### 4.3. Лазеры и усилители на основе разработанных световодов

В последнее время значительное внимание уделяется разработке волоконных усилителей для области длин волн вблизи 1,3 мкм, который по характеристикам, в том числе по быстродействию и перекрестным помехам, будет сравним с эрбиевым усилителем. Это является важной задачей, поскольку при внедрении таких усилителей в системы со спектральным уплотнением каналов (WDM – Wavelength Division Multiplexing), в которых происходят непрерывно управляемые процессы удаления или добавления каналов WDM, перенаправление трафика, защитное переключение и т.д., могут возникать проблемы, связанные с динамическими характеристиками усилителя, так как управление одним каналом может влиять на мощность и шум в других каналах. В таком случае могут возникать перекрестные помехи, связанные с насыщением усиления из-за эффекта уменьшения инверсии населенности в оптическом усилителе.

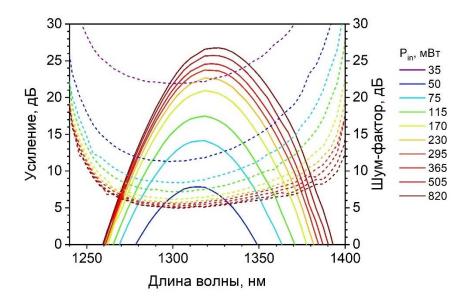


Рисунок 4.9 — Типичные спектры оптического усиления (сплошные) и шум-фактора (пунктирные) усилителя на основе фосфоросиликатного световода, легированного висмутом W-дизайна (Образец 2 см. Таблица 4.1).

Это послужило мотивацией для проведения исследований, направленных на изучение динамических свойств висмутового усилителя, в частности, анализу переходной динамики усиления висмутового усилителя, а также изучению перекрестных помех, возникающих в результате модуляции инверсной населенности. В таких экспериментах был задействован волоконный усилитель на основе 110 м отрезка световода W-дизайна в конфигурации с попутной накачкой от ЛД на длине волны 1230 нм [79], типичные характеристики которого показаны на рисунке 4.9.

# Динамические характеристики и перекрёстные помехи висмутового усилителя для О-диапазона.

На рисунке 4.10 показана экспериментальная установка, используемая для исследования динамических характеристик висмутового усилителя. В этом случае использовались два сигнала на длинах волн 1,31 мкм (модулированный) и 1,33 мкм (непрерывный), которые вводились в усилитель через мультиплексор (Мих). Управление модуляцией сигнала на длине волны 1,31 мкм осуществлялось с помощью генератора электрических импульсов Agilent 33220A. Для изучения

переходных процессов использовалась модуляция в виде прямоугольных импульсов, а для эффектов кросс-модуляции – синусообразной формы. Мощность модулированного сигнала изменялась в пределах от 0,1 до 0,8 мВт, что было достаточным для изменения населенности метастабильного уровня, т.е. переходу висмутового усилителя из режима усиления слабого сигнала в режим насыщения [79]. Непрерывный (пробный) сигнал на длине волны 1,33 мкм, в отличие от модулированного сигнала, имел мощность 50 мкВт и не оказывал влияния на населенность лазерного уровня. В результате пробный сигнал, проходя через висмутовый усилитель, должен испытывать изменения, обусловленные изменением модулированного сигнала, которые регистрировались с помощью фотоприемников PDA 10D-EC и PDA 10CS-EC, подключенных к осциллографу Agilent DSO-X 2024A. Для разделения сигналов, прошедших через висмутовый усилителя, на выходе использовался демультиплексор (Demux) (рисунок 4.10). В экспериментах проводились измерения для различных частот (от 10 Гц до 1 МГц) модуляции сигнала на 1,31 мкм. Измерения спектров выходного излучения из висмутового усилителя осуществлялись c помощью оптического спектроанализатора Agilent 86140B.

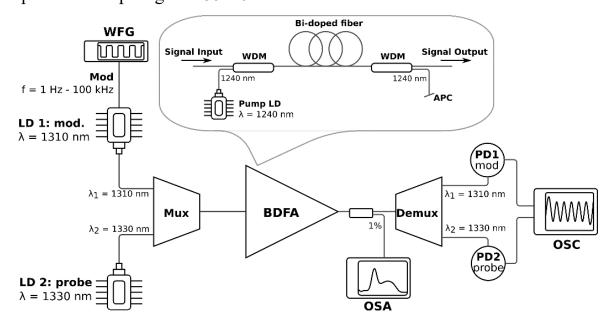


Рисунок 4.10 — Схематичное изображение экспериментальной установки: WFG — генератор импульсов; PD — фотоприемник; LD — лазерный диод; OSC — осциллограф; Mux — мультиплексор; Demux — демильтиплексор; OSA — оптический спектроанализатор. Выше представлена схема висмутового усилителя.

На рисунке 4.11 (а) показаны типичные осциллограммы сигналов на выходе висмутового усилителя при модуляции сигнала прямоугольными импульсами частотой 1 кГц. Видно, что после усиления в висмутовом усилителе передние фронты выходных импульсов на 1,31 мкм имеют выбросы усиления (с экспоненциальным спадом), что обусловлено последующим изменением населенности лазерного уровня [118]. При включении сигнала на 1,31 мкм уровень непрерывного сигнала на 1,33 мкм уменьшался примерно на 25-30%, а при отключении восстанавливался до исходного уровня. Наблюдаемые изменения объясняются вариацией инверсной населенности. По спаду сигнала на 1,31 мкм проводилась оценка характерных времен выхода висмутового усилителя на установившийся режим работы. Зависимость времени насыщения усиления от мощности накачки показана на рисунке 4.11 (б). Как и ожидалось, время насыщения (выхода на стационарный режим работы) усиления сокращались с 45 до примерно 12 мкс с увеличением мощности накачки. Аналогичным образом определялись времена насыщения усиления пробного сигнала. Их зависимость от мощности накачки (рисунок 4.11 в) оказалась близка к аналогичной для модулированного сигнала. После отключения модулированного сигнала ( $P_S = 0.55$ мВт) усиление пробного сигнала возрастало до исходной величины за времена (25-50 мкс в зависимости от мощности накачки), немного большие, чем времена восстановления усиления. На рисунке 4.11 (г) приведена зависимость времени насыщения усиления пробного сигнала от мощности входного модулированного сигнала, показывающая, что при увеличении мощности сигнала на 1,31 мкм, ожидаемо, происходит сокращение времени насыщения/восстановления усиления пробного сигнала при неизменной мощности накачки. В этом случае времена насыщения и восстановления усиления пробного сигнала также получились достаточно близкими.

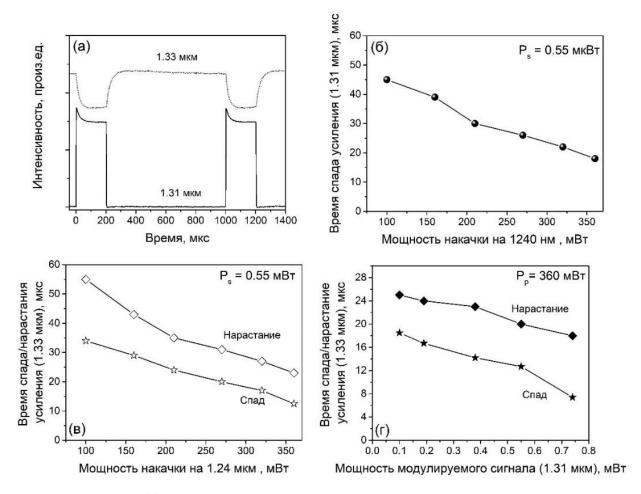


Рисунок 4.11 – (а) Осциллограммы сигналов на выходе из усилителя; зависимости времен спада/нарастания сигнала на 1,31 мкм (б) и 1,33 мкм (в) от мощности накачки; зависимости времени спада/нарастания сигнала на 1,33 мкм от мощности сигнала на 1,31 мкм при постоянной мощности накачки (г).

Зная параметры (мощность насыщения на длине волны накачки и время жизни активных центров на лазерном уровне) висмутового световода  $P_p^{sat} = 0,9$  мВт;  $\tau = 720$  мкс можно оценить предельное время восстановления усиления, используя следующее выражение [118]:

$$au_{rec}=rac{ au}{1+rac{P_p}{P_p^{Sat}}}=rac{720}{390}pprox 1,8$$
мкс

Проведенная оценка времени выхода усилителя на стационарный режим работы  $\tau_{sat}$  показала, что  $\tau_{sat} \approx \tau_{rec}$ . Полученные в результате оценки предельные параметры коррелируют с экспериментальными данными.

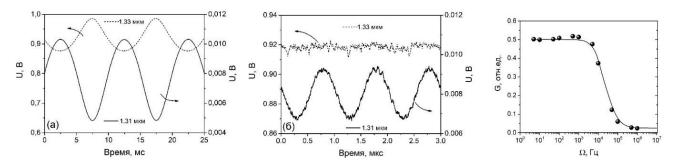


Рисунок 4.12 — Осциллограммы модулированного (сплошная) и пробного (штриховая) сигнала на выходе висмутового усилителя: а) 100 Гц; б) 1 МГц; в) Зависимость отношения минимальной и максимальной оптической мощности пробного сигнала G от частоты модуляции входного сигнала (линия — расчет; символы — эксперимент).

Для изучения эффектов перекрестных помех (кросс-модуляции) висмутовом усилителе сигнал на длине волны 1,31 мкм модулировался с помощью генератора импульсов в виде синуса. На рисунке 4.12 (а и б) показаны формы модулированного и пробного сигналов для частот 100 Гц и 1 МГц. Видно, что синусообразная модуляция ( $\Omega$ =100  $\Gamma$ ц) сигнала на длине волны 1310 нм приводит к соответствующей модуляции пробного сигнала на длине волны 1330 нм. Как и ожидалось, наблюдаемый эффект сильно зависит от частоты модуляции: на более высокой частоте модуляция пробного сигнала заметно ниже, и наоборот. Для оценки влияния кросс-модуляционных процессов на работу оптического усилителя используется зависимость отношения минимальной и максимальной оптической мощности сигнала G от частоты модуляции. Такая зависимость, представлена на рисунке 4.12 (в), была экспериментально получена для исследуемого висмутового усилителя. Видно, что при частотах  $\Omega$ <10 к $\Gamma$ ц процесс кросс-модуляции оказывает заметное влияние на пробный сигнал и может практически не приниматься во внимание при частотах  $\Omega > 100$  к $\Gamma$ ц. Аналогичные результаты для подобного усилителя были достигнуты в работе [119]. Результаты численного расчета представлены рисунке 4.12 (в) хорошо согласуются с экспериментальными данными. Исходя из полученной данных можно утверждать, что перекрестные помехи в изучаемом висмутовом усилителе становятся не существенными на частотах модуляции выше 100 кГц, демонстрируя таким образом возможность

практического применения висмутовых усилителей для О-диапазона в многоканальных высокоскоростных системах оптической связи.

Волоконный лазер на основе висмутового фосфоросиликатного световода с пьедесталом.

Одна из разновидностей световодов перспективных для создания мощных лазерных систем является конструкция с увеличенным диаметром поля моды. Для сохранения одномодового режима распространения излучения в таких световодах, как правило, используется подход, основанный на уменьшении показателя преломления центральной области (активной сердцевины) путем вариации химического состава стекла. Получение таких структур применительно к висмутсодержащим материалам является важной научно-технологической задачей. Однако общепринятый подход в данном случае неэффективен, поскольку изменение состава стекла активной сердцевины влияет на формирование ВАЦ. Это особенно критично для световодов, в которых происходит формирование ВАЦ, ассоциированных с P, как уже обсуждалось при рассмотрении световодов Wдизайна. Поэтому в данной работе использовался другой подход, основанный на создании пьедестальной структуры. В этом случае вокруг сердцевины создавалась область уже с повышенным (относительно кварцевого стекла) показателем преломления, размер которой составлял примерно 4-5 размеров сердцевины. В такой структуре фундаментальная мода распространяется в сердцевине с выходом в пьедестал, но не в кварцевую оболочку, для которая постоянная распространения учитывает лишь  $\Delta n$  как разницу показателя преломления сердцевины и пьедестала. Таким образом, происходит "искусственное" изменение (уменьшение) Дл при относительно высоком показателе преломления сердцевины, что открывает дополнительные возможности для изменения (увеличения) размера сердцевины (следовательно, увеличение диаметра поля моды) при сохранении одномодового режима распространения. Используя данный подход, была реализована заготовка из фосфоросиликатного стекла с висмутом. ППП данной заготовки показан на рисунке 4.13 (а). Видно, что разница показателей преломления активной

сердцевины/пьедестала и кварцевой оболочки равен 0,0045/0,003, соответственно, т.е. эффективный  $\Delta n \sim 0,0015$ . Это позволило примерно увеличить в 3 раза размер сердцевины по сравнению со стандартными висмутовыми световодами ( $\sim 5-6$  мкм). Пьедестал был также сделан из фосфоросиликатного стекла, что позволяло надеяться на сохранение типичных свойств ВАЦ. Кроме того, в такой структуры, также, как и в вышеописанных, происходила модификация приграничных слоев нелегированного Ві и нелегированного стекла.

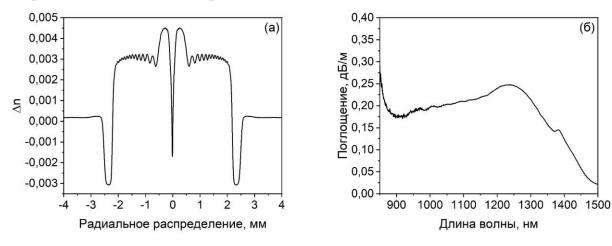


Рисунок 4.13 – а) ППП заготовки с пьедесталом; б) Спектр поглощения (по сердцевине) одномодового световода.

На рисунке 4.13 (б) показан спектр поглощения световода, вытянутого из данной заготовки. В этом случае можно наблюдать полосу сложной структуры, что вполне типично для висмутовых световодов с фосфоросиликатной сердцевиной. Для оценки качества полученной структуры световода были проведены лазерные эксперименты. Результаты представлены на рисунке 4.14 (а), где приведены зависимости выходной мощности лазера, работающего на длине волны ~1310 нм, от введенной/поглощенной мощности накачки на длине волны 1230 нм. Видно, что на данном типе световода получены лазер cрекордными значения дифференциальной эффективности 47%. Более подробные результаты по анализу выходных характеристик лазера на основе такого световода представлены рисунке 4.14 (б). Сравнительный анализ показал, что результаты на рисунке 4.14 (а) соотвествуют оптимальным параметрам резонатора лазера, построенного по

линейной схеме с высокоотражающей ВБР на 1310 нм и сколотым торцом активного световода.

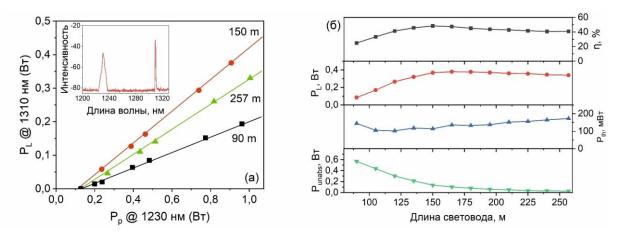


Рисунок 4.14 - a) Зависимость выходной мощности лазера  $P_L$  от введенной мощности накачки  $P_p$  в сердцевину активного световода для разных длин. Вставка – спектр лазерной генерации; б) Характерные зависимости выходных параметров лазера от длины активного световода.

На рисунке 4.15 показана экспериментально полученная карта распределения интенсивности выходного лазерного излучения и излучения непоглощенной накачки (в ближнем поле).

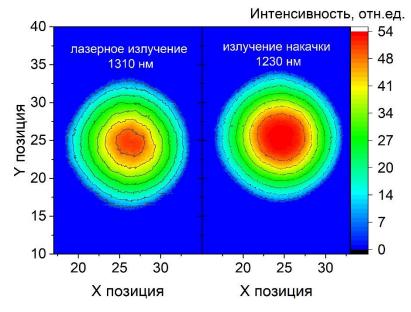


Рисунок 4.15 — Распределение интенсивности выходного лазерного излучения и излучения непоглощенной накачки.

Видно, что для обеих длин волн форма пучка имеет симметричный вид, близкий к Гауссовой функции. Это позволяет ожидать высокую степень локализации излучения в фундаментальной моде, распространяющейся в

центральной области структуры, т.е.  $M^2 < 1,2$ , что крайне важно с практической точки зрения.

Таким образом, можно сделать вывод, что полученная структура является световедущей по центральной части с учетом пьедестала, устойчива к макроизгибам, имеет фундаментальную моду с увеличенной площадью, показывает рекордные характеристики в лазерных экспериментах. Из всего вышеперечисленного следует, что данный подход позволяет получать активные среды, которые могут быть использованы в дальнейших экспериментах по масштабируемости выходной мощности висмутовых лазеров. Следует отметить, что потенциальные возможности висмутовых световодов с таким дизайном требуют дальнейшего более глубокого научного исследования.

#### 4.4. Выводы к Главе

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) Предложена концепция плавного управления оптическими свойствами висмутовых волоконных световодов с сердцевиной из фосфоросиликатного стекла за счёт использования W-дизайна ППП. Была реализована серия висмутовых световодов с W-дизайном с различным содержанием оксида фосфора, в том числе, с достаточно низким содержанием оксида фосфора (<2 мол.%), позволив достичь в сердцевине близких концентраций различных типов висмутовых активных центров (ВАЦ), ассоциированных с атомами Si и P. В результате было продемонстрировано, что такой подход может быть использован для создания активной среды с широким, плоским контуром оптического усиления за счет взаимного перекрытия полос усиления ВАЦ-Si и ВАЦ-P.
- 2) На основе висмутовых световодов W-дизайна был реализован висмутовый усилитель, предназначенный для О-диапазона, который использовался для экспериментального исследования переходных процессов и перекрестных помех

(кросс-модуляционных эффектов), вызванных модуляцией усиления в активной среде. Были получены зависимости времен снижения и восстановления коэффициента усиления от мощности используемого сигнала на 1,31 мкм и накачки на 1,23 мкм. Установлено, что характерные времена спада и нарастания усиления в активной среде могут варьироваться в пределах 10–30 и 20–60 мс в зависимости от выбранных параметров сигнала и накачки. Кроме того, была проведена оценка предельного времени восстановления усиления, которое составило 1,8 мкс. Также получена зависимость изменения отношения G минимальной и максимальной оптической мощности пробного сигнала на длине волны 1,33 мкм, вызванного модулированным сигналом на 1,31 мкм, от частоты модуляции Ω в диапазоне от 10 Гц до 1 МГц. Исходя из полученной зависимости и результатов численного расчета установлено, что перекрестные помехи в изучаемом висмутовом усилителе становятся не существенными на частотах модуляции выше 100 кГц, подтверждая таким образом возможность практического применения таких усилителей для Одиапазона в многоканальных высокоскоростных системах оптической связи.

3) Разработан и исследован висмутовый световод с пьедесталом из фосфоросиликатного стекла. Установлено, что в таком световоде формируются ВАЦ-Р, имеющие хорошо известные полосы поглощения и люминесценции в ИКобласти. Показано, что разработанная конструкция является световедущей, т.е. оптическое излучение в основном распространяется с низкими макроизгибными потерями в фундаментальной моде, имеющей увеличенную площадь; показывает рекордные характеристики в лазерных экспериментах, в частности, на основе такого световода получена лазерная генерация на длине волны 1310 нм с дифференциальной эффективностью 47% от поглощенной мощности накачки (ввод накачки в сердцевину световода) на длине волны 1230 нм. Таким образом, было показано, что данный подход может быть эффективно использован (применительно к висмутсодержащим материалам) для получения световодов с увеличенным размером поля моды, которые в дальнейшем могут быть использованы в экспериментах по масштабируемости выходной мощности таких лазеров.

4) Проведено подробное исследование совместного влияния процессов тепловой и лазерной обработки на оптические свойства фосфоросиликатных световодов, легированных висмутом. Установлено, что разрушение лазерноактивных центров в таких световодах происходит под воздействием лазерного излучения на длинах волн 532 нм и 1240 нм при температурах 300-600 °C. Показано, что скорость деградации оптических свойств изучаемых световодов повышается с увеличением температуры и/или уменьшением длины волны воздействующего излучения. Обратный процесс, т.е. процесс формирования ВАЦ-Р, индуцированный тепловой обработкой, значительно слабее (примерно на порядок величины), чем процесс их фотоиндуцированного Разработана феноменологическая модель, учитывающая оптические процессы возбуждения ВАЦ и термически активированный химический процесс первого порядка, применение которой для описания экспериментальных данных, позволила определить среднее значение и распределение энергий активации. В результате была установлено, что энергия активации процесса разрушения ВАЦ, вызванного различным по длине волны лазерным излучением, составляет 1–1,24 эВ (для 532 нм) и 1,98 эВ (для 1240 нм). Обнаружено, что при воздействии лазерного излучения на 532 нм помимо деградации ВАЦ-Р, происходит разрушение сосуществующих ВАЦ-Si. Экспериментально установлено, что скорость протекания процессов, приводящих к фотообесцвечиванию ВАЦ-Р, заметно выше для световода с Wдизайном по сравнению со стандартным световодом (со ступенчатым профилем показателя преломления). Одним из возможных механизмов разрушения ВАЦ-Р, в фосфоросиликатных световодах, легированных висмутом, является фотоиндуцированная трансформация центров О = Р (О-Si)3, находящихся вблизи активного центра. Установлено, что интенсивность процессов деградации ВАЦ-Si зависит от химического состава стеклянной матрицы, указывая тем самым на важную роль структурных элементов сетки стекла на процесс формирования ВАЦ.

## Глава 5 Висмутовые волоконные лазеры и оптические усилители с многомодовой накачкой

Основные результаты данной главы опубликованы в работах [103, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127].

В настоящей главе приводятся пионерские результаты по достижению оптического усиления и лазерной генерации на основе висмутовых световодов при многомодовой диодной накачке.

# 5.1. Принцип работы: схема энергетических уровней ВАЦ и оптических переходов

Как уже известно, добавление висмута в германосиликатную стеклянную матрицу приводит к появлению полос поглощения ВАЦ-Si, на оптических переходах которых достигается лазерная генерация ИК излучения в области длины волны 1.4 мкм (рисунок 5.1). Схема лазерной генерации в случае использования накачки в сердцевину висмутовых световодов является квазитрехуровневой, поскольку возбуждение ВАЦ осуществляется длинноволновым излучением (~ 1,2 — 1,3 мкм для ВАЦ-P и ВАЦ-Si; 1,45 — 1,55 мкм для ВАЦ-Ge) непосредственно на верхний лазерный уровень (резонансная накачка) (рисунок 5.16).

Такой подход является наиболее приемлемым из-за отсутствия мощных одномодовых источников с длиной волны излучения в более коротковолновой спектральной области (700 – 900 нм). В случае многомодовой диодной накачки такую схему генерации (квазитрехуровневую) использовать крайне неэффективно по ряду причин: 1) низкий уровень поглощения ВАЦ в данных областях длин волн; 2) отсутствие мощных многомодовых ЛД накачки; 3) заметное поглощение полимерного покрытия. В этом отношении более привлекательным выглядит использование чисто трехуровневой схемы генерации с задействованием

вышерасположенного энергетического уровня  $E_3$  для возбуждения ВАЦ (рисунок 5.1 б), с которого будет осуществляться безызлучательный переход на верхний лазерный уровень  $E_2$ . Аналогичная схема генерации уже использовалась для получения лазерной генерации в ИК области на основе висмутовых световодов, но при накачке в сердцевину с помощью одномодовых лазерных источников [72].

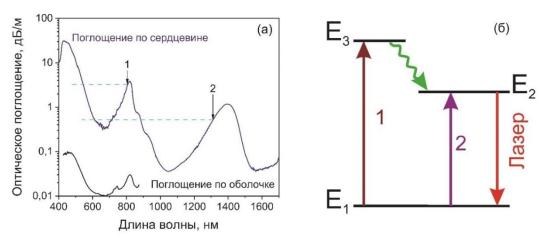


Рисунок 5.1 – а) Спектры поглощения (по оболочке и сердцевине) висмутового световода с сердцевиной из германосиликатного стекла; б) диаграмма энергетических уровней ВАЦ и основных переходов, связанных с возбуждением ВАЦ и лазерной генерацией.

Одно из очевидных преимуществ такого подхода заключается в доступности мощных многомодовых диодов накачки, спектр излучения которых хорошо совпадает с полосами поглощения ВАЦ-Si и ВАЦ-P, имеющих более высокий уровень интенсивности по сравнению с длинноволновыми полосами поглощения. Однако, следует отметить, что квантовый дефект в такой схеме лазерной генерации заметно выше, чем при резонансной накачке, что неизбежно будет сказываться на эффективности лазерной генерации таких лазеров.

Кроме того, в такой системе необходимо обеспечивать быстрое расселение энергетического уровня  $E_3$  на верхний лазерный уровень  $E_2$ , чтобы, с одной стороны, уменьшить вероятность процессов поглощения из возбужденного состояния с переходом на более высокие уровни или вынужденного расселения с переходом ВАЦ в основное состояние, а, с другой стороны, эффективно заселять метастабильный лазерный уровень.

Важной характеристикой висмутового световода, которая может оказывать влияние на эффективность устройств, являются неактивные потери, обусловленные примесями и неоднородностями в стеклянной матрице, а также наличием кластерных форм висмута (ненасыщаемые потери). Известно, что уровень ненасыщаемых потерь, связанных с висмутом, возрастает при переходе в коротковолновый диапазон, что накладывает определенные ограничения на предельно достижимые параметры разрабатываемых устройств, особенно с накачкой в оболочку. На рисунке 5.2 показаны зависимости изменения поглощения в отрезке висмутового световода с сердцевиной из германосиликатного стекла при вводе лазерного излучения на 808 нм и 1340 нм различной мощности. Видно, что остаточный (ненасыщаемый) уровень потерь сильно отличается (более чем в 20 раз), около 2% для 1340 нм и 15% для 808 нм.

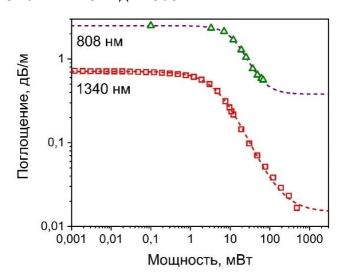


Рисунок 5.2 — Зависимости изменения коэффициента поглощения германосиликатного световода с висмутом от введенной мощности излучения на длинах волн 808 нм и 1340 нм. Излучение вводилось в сердцевину активного световода.

### 5.2. Висмутовые волоконные лазеры с многомодовой диодной накачкой

Предпосылки для создания висмутовых лазеров с накачкой по оболочке фактически появились в 2008 г. после успешной демонстрации возможности получения лазерной генерации в висмутовых световодах при использовании в

качестве оптической накачки одномодового излучения на длине волны 800 нм [56]. Успешные подобные эксперименты с использованием разработанных световодов усилило интерес к созданию таких источников.

Используя линейную конфигурацию, описанную в Главе 2, была успешно получена стабильная лазерная генерация при накачке многомодовым ЛД на 808 нм (рисунок 5.3). Висмутовый лазер в конфигурации 100%-4% работал на длине волны 1440 нм, что определялось используемой ВБР, тогда как в конфигурации 4%-4% генерация возникала в области максимального коэффициента усиления. Дифференциальная эффективность висмутового лазера в конфигурации 4%-4% составляла около 0,1 %, что заметно ниже, чем в конфигурации 100%-4%. Максимальная выходная мощность около 50 мВт была достигнута в конфигурации 100%-4% лазера с дифференциальной эффективностью 0,5 %.

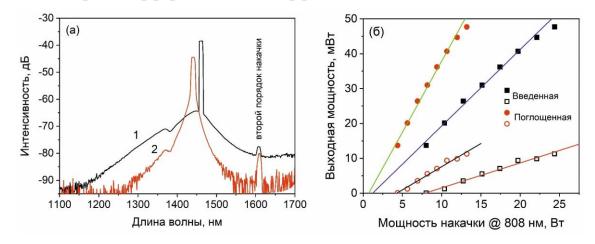


Рисунок 5.3 — (а) Спектры излучения исследованных висмутовых лазеров в конфигурациях 100%-4% и 4%-4% при длине световода 100 м; (б) Выходная мощность висмутовых лазеров с накачкой в оболочку в зависимости от введенной и поглощенной мощности накачки (сплошные и пустые символы соответствуют конфигурации 100%-4% и 4%-4%, соответственно).

Низкая эффективность разработанных висмутовых лазеров может быть объяснена фундаментальными особенностями, присущими висмутовым световодам, такими как относительно высокий уровень ненасыщаемых потерь в области длин волны 800 нм, а также иных процессов, например, расселение верхнего лазерного уровня из-за поглощения фотонов накачки.

После создания первых лазеров с накачкой по оболочке на основе германосиликатных световодов с висмутом, возник интерес по применению

висмутовых световодов другого типа, а именно, с фосфоросиликатной сердцевиной, предназначенных для генерации оптического излучения в области длин волн 1,3-1,4 мкм.

Спектр оптического поглощения световода представлен на рисунке 5.4, где можно отчетливо наблюдать полосу вблизи длины волны 0,75 мкм, в край которой попадает длина волны коммерчески доступного лазерного диода накачки. Схема уровней оптических переходов ВАЦ-Р полностью соответствует аналогичной для ВАЦ-Si с той лишь разницей, что энергия переходов заметно больше [46].

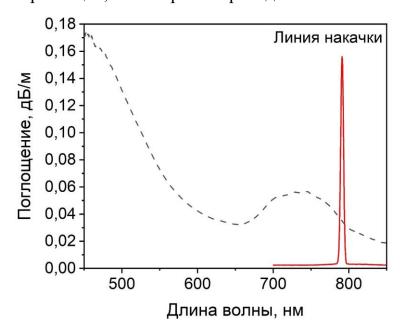
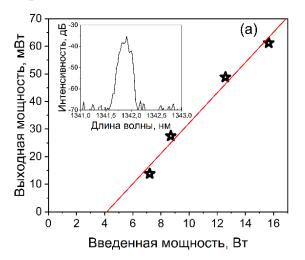


Рисунок 5.4 — Спектр поглощения слабого сигнала, распространяющегося по оболочке висмутового световода, (штриховая линия) и линия излучения многомодового диода накачки (сплошная линия)

Изначально была достигнута устойчивая лазерная генерация в резонаторе, состоящем из отрезка висмутового световода длиной 120 м, где обратная связь обеспечивалась исключительно 4%-отражением от торцов активного световода и сигнального световода многомодового объединителя накачки и сигнала, т.е. в режиме свободной генерации. Длина волны лазерной генерации в этом случае была вблизи 1,34 мкм, как видно из спектра излучения, представленного на рисунке 5.5 (вставка). Дифференциальная эффективность такого лазера составила около 0,5% при пороговой мощности накачки 4 Вт (рисунок 5.5). Дифференциальная эффективность лазера уменьшалась примерно до 0,2%, если вместо одного из

торцов использовалась ВБР (ширина спектра отражения составляла 0,5 нм) с коэффициентом отражения близким к 100% на длине волны ~1,34 мкм. В такой конфигурации пороговая мощность лазерной генерации значительно ниже — ~1 Вт, что вполне ожидаемо. Спектр излучения на выходе из лазера представлен на рисунке 5.5 (б), где помимо линий накачки и генерации можно также наблюдать полосы люминесценции с первого и второго возбужденного уровня. Провал в спектре люминесценции около 1,18 мкм обусловлен поглощением полимерного покрытия.



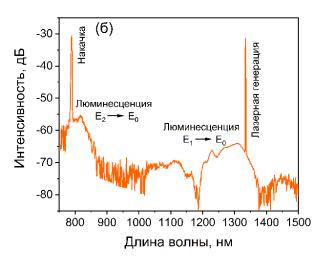


Рисунок 5.5 – а) Зависимость выходной мощности лазера с 4%-отражением от торцов на 1.34 мкм от введенной мощности накачки на 793 нм. Линия генерации показана на вставке; б) Обзорный спектр излучения на выходе из висмутового лазера с 4%-отражением от торцов.

Если же вместо ВБР использовались спектрально-неселективные элементы (торец световода или зеркало Саньяка), то в экспериментах наблюдалось плавное изменение длины волны генерации с ростом вводимой мощности накачки. Причина возникновения данного эффекта связана с неоднородным уширением спектра усиления ВАЦ-Р в таких световодах, в результате чего происходит смещение максимума полосы усиления активной среды при увеличении мощности накачки.

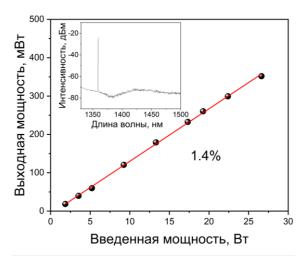


Рисунок 5.6 – Зависимости выходной мощности висмутового лазера от введенной мощности накачки. Спектр выходного излучения (вставка).

Создание висмутового лазера с длинным резонатором (200 м) привело к достижению максимальных значений эффективности 1,4% и выходной мощности ~350 мВт (при использовании высокоотражающей ВБР на 1360 нм) (рисунок 5.6). Следует отметить, что важность полученных результатов, как и для световодов из германосиликатного стекла с висмутом, заключается в экспериментальном доказательстве принципиальной возможности достижения лазерной генерации в висмутовых световодах с вводом излучения накачки в оболочку.

# 5.3. Влияние геометрии (формы и размера) световедущей оболочки на эффективность висмутовых лазеров с многомодовой накачкой

Как уже выше упоминалось, одним из способов оптимизации дизайна активного световода для эффективного использования многомодовой накачки является создание определенной формы внутренней оболочки, как правило, квадратного, три-, шести- или восьмиугольного сечения. Такой подход позволял добиться световедущей конструкции, в которой подавлены моды, которые практически не перекрываются с сердцевиной, что приводило к неполному поглощению излучения накачки и снижало энергоэффективность устройств.

На данном этапе решалась задача по изучению влияния геометрии световедущей оболочки на оптические свойства висмутовых световодов и параметры устройств на их основе. Для этой цели использовалась заготовка, имеющая G-дизайн, с продольным равномерным распределением химических элементов, которая была разделена на три одинаковых сегмента по несколько десятков сантиметров каждый. Из одного был изготовлен одномодовый световод круглым дизайном внутренней оболочки (F1), тогда как другие являлись заготовками для изготовления световодов с некруглой формой оболочки. Для этого изначально поверхность исходной заготовки огранялась и полировалась для получения желаемой структуры (в данном случае форма оболочка была близка к прямоугольной). В результате были получены световоды с площадью поперечного сечения внутренней оболочки:  $125 \times 125 \text{ мкм}^2$  (F2) и  $80 \times 80 \text{ мкм}^2$  (F3). Следует отметить, что образец F3 был маломодовый в спектральной области 1,4–1,45 мкм  $(\lambda_{\rm c} \approx 1.8 \, {\rm Mkm})$ , поскольку в нем было реализовано увеличенное отношение размеров сердцевины и оболочке, в отличие от световодов F1 и F2. Изображения поперечного сечения исследуемых образцов показаны на рисунке 5.7. Можно заметить, что висмутовые световоды имели структурированную сердцевину, состоящую из двух слоев с различным содержанием германия (G-дизайна), аналогичны предыдущим образцам световодов, которые уже рассматривались ранее. Диаметр сердцевины световода был близок к 8 мкм для F1 и F2, тогда как сердцевина световода для F3 составляла почти 11,5 мкм. На рисунке 5.7 (a) показаны спектры поглощения излучения, распространяющегося по внутренней оболочке исследованных световодов. Во всех спектрах можно видеть характерную полосу, достигающую максимума на длине волны 820 нм и хвост коротковолновой полосы ВАЦ-Si. Полоса, достигающая максимума около 750 нм, вероятно, обусловлена полимерным покрытием. Как и ожидалось, среди исследованных образцов световод F3 с наибольшим отношением сердцевины к оболочке имел наибольшее значение поглощения на 820 нм  $\approx$ 60 дБ/км, что почти в 2 раза больше, чем у F1 (30 дБ/км) и F2 (≈36 дБ/км). Небольшая разница в значениях поглощения образцов F1 и F2 может быть объяснена тем фактом, что процесс вытягивания

соответствующих заготовок привел к изменению формы внутренней оболочки F2 световода, которая стала ближе к круглой конструкции из-за достаточно высокой температуры вытягивания (в текущем исследовании не было цели сохранять внутреннюю оболочку строго прямоугольной, и основное внимание уделялось поддержанию одинаковых условий вытягивания для всех исследованных световодов, что могло повлиять на концентрацию ВАЦ).

С использованием таких световодов были выполнены лазерные эксперименты по схеме с линейной конфигурацией, образованной активным световодов и парой зеркал ( $\approx 100\%$  отражающую ВБР на длине волны 1460 нм ( $\Delta\lambda\approx 1$  нм) и перпендикулярно сколотый торец световода, обеспечивающий  $\approx 4\%$  обратного отражения). Первоначально были изучены выходные характеристики непрерывного висмутового лазера на основе исследуемых световодов длиной 200 м. Типичный спектр выходного излучения висмутового лазера с накачкой в оболочке показан на рисунке 5.8 (а). Можно наблюдать как полосы усиленного спонтанного излучения, так и линии генерации лазера и накачки при 1,46 и 0,8 мкм, соответственно.

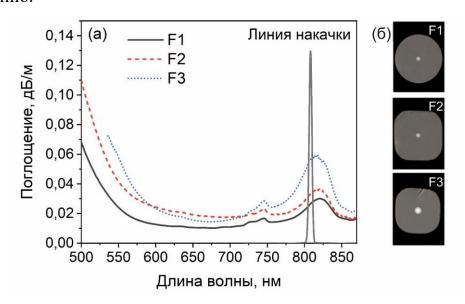


Рисунок 5.7 – (a) Спектры поглощения исследованных световодов в оболочке. (b) Изображения поперечных сечений световодов F1, F2 и F3 с помощью электронного микроскопа.

Следует отметить, что лазер на основе F3 стабильно работал в одномодовом режиме при соответствующей длине волны, даже несмотря на то, что световод был способен направлять несколько поперечных мод. Это может быть объяснено

селекцией мод, обеспечиваемой используемым ВБР, записанной в сердцевине одномодового световода, подобного SMF-28. Зависимости выходной мощности висмутовых лазеров от поглощаемой мощности накачки показаны на рисунке 5.8 (б). Полученные зависимости для образцов F2 и F3 были нелинейными. Монотонное уменьшение приращения выходной мощности висмутового лазера происходило с увеличением мощности накачки (частичное насыщение выходной мощности). Эта тенденция была менее заметна в случае висмутового лазера на основе образца F1 (рисунок 5.8 б). При относительно низких мощностях эффективность наклона висмутового лазера может достигать ≈4,3% для F3 и 2,6% для F2. С увеличением мощности накачки эффективность наклона становилась заметно ниже (почти 1% как для световодов F2, так и F3). Наблюдаемое поведение насыщения выходной мощности более подробно будет исследовано в следующем разделе данной главы.

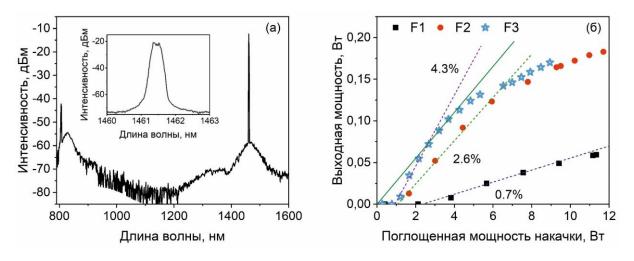


Рисунок 5.8 — (а) Типичный спектр выходного излучения разработанного висмутового лазера с ВБР. (Лазерная линия, измеренная со спектральным разрешением 0.07 нм, изображена на вставке.) (б) Выходная мощность висмутовых лазеров с ВБР от поглощенной мощности накачки, измеренная для образцов световодов длиной L = 200 м.

Крайне важно было в таком случае оптимизировать длину активного световода для получения максимально достижимых параметров висмутовых лазеров. Поэтому последующие исследования были сосредоточены на изучении висмутовых лазеров на основе отрезков разной длины образца F3, с ВБР, где ожидался наиболее значительный эффект. Для этого в лазерных экспериментах

помимо исходной длины световода 200 м использовались отрезки световода длиной 100 и 300 м. Полученные результаты представлены на рисунке 5.9 (а). Как и следовало ожидать, изменение длины активного световода существенно повлияло на выходные характеристики висмутового лазера. Во-первых, эффект насыщения выходной мощности стал заметен даже при малых мощностях накачки, особенно для висмутового лазера с наименьшей длиной резонатора (рисунок 5.9 б). Наличие данного эффекта становится очевидным после построения первой производной от полученных зависимостей (рисунок 5.9 а). Как видно, с увеличением мощности накачки происходит монотонное уменьшение дифференциальной эффективности висмутового лазера с ≈3-5% до <1%. Эта тенденция была одинакова для различных длин активных световодов. При дальнейшем эффективности увеличении мощности накачки изменения висмутового лазера становились значительно меньше.

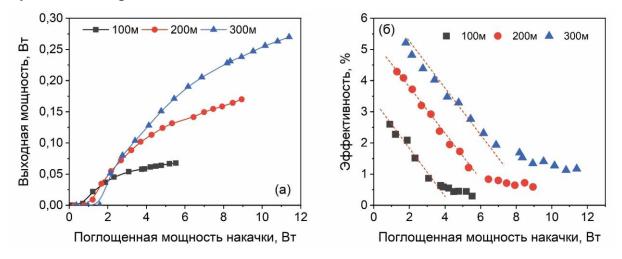


Рисунок 5.9 – Выходная мощность (а) и дифференциальная эффективность (б) висмутовых лазеров в зависимости от поглощенной мощности накачки. В экспериментах использовали F3 различной длины 100, 200 и 300 м.

Максимально достигнутая выходная мощность таких лазеров составила 270 мВт. Режим работы висмутового лазера на торцах с использованием образца F3 сильно отличался от лазера с ВБР. В этом случае формировалась многоволновая генерация, а спектральный диапазон генерации определялся длиной висмутового световода (резонатора), поскольку, как это обычно бывает, максимальное усиление с увеличением длины световода смещалось в сторону больших длин волн из-за

эффекта перепоглощения. Вот почему висмутовые лазеры с более короткими длинами волн имели более короткие резонаторы, и наоборот. Следует отметить, что этот режим генерации был неустойчивым, что проявлялось в изменении интенсивности наблюдаемых лазерных линий со временем.

Таким образом, изменение геометрии внутренней оболочки и соотношения размеров сердцевины и оболочки, позволили повысить эффективность лазеров с накачкой по оболочке примерно 5 – 6 раз. Что касается выходной мощности, то при определенных мощностях накачки наблюдается эффект насыщения выходной мощности, не позволяя достичь значений ваттного уровня.

## 5.4. Эффект насыщения выходной мощности висмутовых лазеров с накачкой по оболочке: причина, моделирование, эксперимент

Эффект насыщения выходной мощности висмутовых лазеров с накачкой по оболочке отчетливо наблюдался при анализе выходных характеристик висмутовых германосиликатных лазеров с накачкой в оболочку (см. Раздел 5.3). Ранее данный эффект не наблюдался, а потому механизм его возникновения оставался неизученным, что и послужило поводом для выполнения исследований, описанных в текущем разделе.

Сначала характеристики висмутовых лазеров были изучены в стандартной конфигурации, т.е. при накачке в оболочку многомодовым ЛД на длине волны 793 нм для фосфоросиликатного световода и 808 нм для германосиликатного световода. Как и ожидалось, возникала стабильная непрерывная лазерная генерация на длинах волн 1360 нм и 1460 нм. На рисунке 5.10 показаны спектры генерации и мощностные характеристики лазеров на переходах ВАЦ-Si и ВАЦ-Р, соответственно.

Эффективность висмутовых лазеров при низких мощностях накачки (до 10 Вт) была близкой и составляла ~1%. Однако, когда мощность накачки превышала уровень 10 Вт, наблюдалось насыщение выходной мощности висмутового лазера,

работающего на 1460 нм. В отличие от этого, висмутовый лазер, работающий на длине волны 1360 нм, не показал признаков насыщения выходной мощности (рисунок 5.10 б). Чтобы понять причину наблюдаемого эффекта, следует рассмотреть энергетическую диаграмму уровней ВАЦ, которая в упрощенном виде, соответствующая типичной трехуровневой лазерной среде с задействованными переходами, представлена на рисунке 5.11.

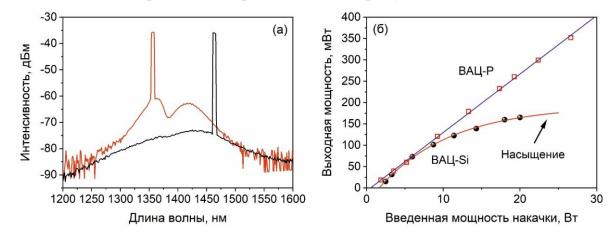


Рисунок 5.10 – (а) Выходные спектры излучения фосфосиликатных и германосиликатных волоконных лазеров, легированных висмутом, работающих при 1360 и 1460 нм соответственно; (б) выходная мощность лазеров на основе легированных висмутом фосфосиликатных (квадраты) и и германосиликатных (шарики) световодов в зависимости от мощности накачки.

В этом случае излучение накачки возбуждает ВАЦ из основного состояния (уровень 1) на уровень 3. После этого уровень 3 расселяется преимущественно за счет спонтанного перехода на уровень 1 и безызлучательного на уровень 2. Если более половины ВАЦ находится в возбужденном состоянии, то можно достичь инверсной населенности между уровнями 2 и 1, оптический переход между которыми обеспечивает лазерную генерацию. Предполагалось, что эффект насыщения выходной мощности висмутового лазера вызван именно "неэффективностью" заселения метастабильного лазерного уровня N<sub>2</sub> из-за продолжительного времени релаксации ВАЦ с уровня 3 и отличного от 1 коэффициента разветвления для самопроизвольного перехода A<sub>32</sub>.

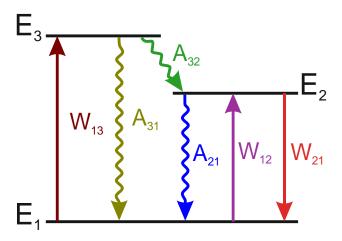


Рисунок 5.11 – Диаграмма уровней энергии лазера ВАЦ с возможными переходами.

Чтобы оценить время жизни ВАЦ на уровне 3, были измерены кривые затухания люминесценции ВАЦ-Р и ВАЦ-Si после импульсного возбуждения соответствующих ВАЦ на уровень 3. Полученные зависимости приведены на рисунке 5.12. Кроме того, представлена начальная часть кривых затухания люминесценции ВАЦ с верхнего лазерного уровня, полученных при тех же условиях возбуждения.

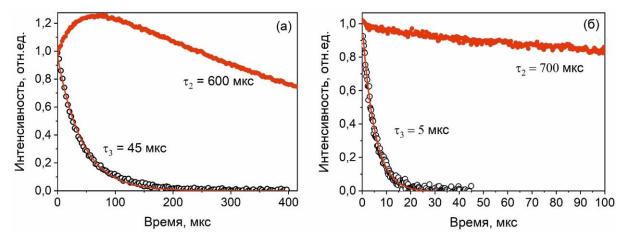


Рисунок 5.12 — Кривые затухания люминесценции ВАЦ-Si (a) и ВАЦ-P (б), соответствующие переходам  $E3 \rightarrow E1$  (пустые символы) и  $E2 \rightarrow E1$  (полные обозначения).

Кривые затухания люминесценции, соответствующая  $E3 \rightarrow E2$  переходам в обоих случаях, хорошо согласуются с одной экспоненциальной функцией. Характерное время  $\approx$ 45 мкс для ВАЦ-Si был почти на порядок больше, чем у ВАЦ-P,  $\approx$ 5 мкс. Как можно наблюдать на рисунке 5.12 (а), после прекращения возбуждения (t = 0) наблюдается заметное увеличение интенсивности люминесценции ВАЦ-Si, возникающей из-за перехода ВАЦ с уровня 3, в отличие

от ВАЦ-Р, которые не характеризуются интенсивности люминесценции. Этот эффект возникает из-за того, что ВАЦ-Si имеют относительно более длительный процесс расселения уровня 3 по сравнению с ВАЦ-Р (рисунок 5.12 б).

Для выяснения влияния времени жизни уровня накачки на предельную выходную мощность лазеров было проведено численное моделирование работы таких лазеров. Помимо указанных выше переходов, в модели трехуровневого лазерной среды учитывались также вынужденный и спонтанный переходы, которые отмечены на рисунке 5.11 прямой и волнистой стрелками, соответственно. В модели не учитывался вынужденный переход  $E3 \rightarrow E1$  из-за малой вероятности такого процесса по сравнению с другими. Скорости вынужденного излучения ( $E2 \rightarrow E1$ ) и поглощения ( $E1 \rightarrow E2$ ) перехода обозначались  $W_{12}$  и  $W_{21}$ , а скорость спонтанного излучения  $A_{21}$ . Скоростные уравнения населенности соответствующих уровней  $N_1$ ,  $N_2$  и  $N_3$  имели следующий вид:

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{13}N_1 - A_{31}N_3 - A_{32}N_3$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 + A_{32}N_3 - A_{21}N_2$$

$$N_{tot} = N_1 + N_2 + N_3$$
(5.1)

где  $N_{tot}$ — полная концентрация ВАЦ,  $A_{31}$  и  $A_{32}$  — спонтанные переходы с уровня 3 в основное состояние и верхний лазерный уровень, соответственно. При стационарных условиях, система скоростных уравнений (5.1) переходит в систему алгебраических уравнений, которую можно представить в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \frac{W_{13}}{A_{31} + A_{32}} & 0 & -1\\ \frac{W_{12}}{A_{21}} & -\left[\frac{W_{21}}{A_{21}} + 1\right] & \frac{A_{32}}{A_{21}} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1\\ N_2\\ N_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0\\ 0\\ N_{tot} \end{pmatrix}$$
(5.2)

Скорости спонтанных переходов выражались через время жизни соответствующего уровня  $\tau_3 \equiv \tau_p$ , время жизни верхнего лазерного уровня  $\tau_2 \equiv \tau$  и коэффициент ветвления  $\beta$  следующим образом:

$$\tau_{p} \cdot W_{13} = \left(\frac{\tau_{p} \sigma_{a}^{p}}{h \nu_{p}} \frac{1}{\pi R^{2}}\right) \cdot P_{p}$$

$$\tau \cdot W_{12} = \tau \cdot \sigma_{a}^{s} \cdot \frac{I_{s}}{h \nu_{s}} = \frac{1}{1 + \sigma_{e}^{a} \sigma_{a}^{s}} \left(\frac{\tau(\sigma_{a}^{s} + \sigma_{e}^{s})}{h \nu_{s}} \frac{1}{\pi \omega_{s}^{2}}\right) \cdot P_{s}$$

$$\tau \cdot W_{21} = \tau \cdot \sigma_{e}^{s} \cdot \frac{I_{s}}{h \nu_{s}} = \frac{\sigma_{e}^{s} / \sigma_{a}^{s}}{1 + \sigma_{e}^{s} / \sigma_{a}^{s}} \left(\frac{\tau(\sigma_{a}^{s} + \sigma_{e}^{s})}{h \nu_{s}} \frac{1}{\pi \omega_{s}^{2}}\right) \cdot P_{s}$$

$$(5.3)$$

где  $A_{12} = \tau_2^{-1}$ ,  $A_{31} + A_{32} = \tau_2^{-1}$ ,  $A_{32} = \beta \cdot \tau_2^{-1}$ ,  $\sigma_a^p$  — сечение поглощения на длине волны накачки  $\lambda_p$ ;  $\sigma_a^s$  и  $\sigma_e^s$  — сечения поглощения и излучения на длине волны сигнала  $\lambda_s$  соответственно;  $I_p$  и  $I_s$  — интенсивности накачки и сигнала;  $\nu_p$  и  $\nu_s$  — частоты накачки и сигнала.

Поскольку все лазеры накачивались по оболочке, то эффективная площадь излучения накачки оценивалось как  $A_p^{eff} = \pi \omega_p^2 \approx \pi R^2$ , где R — радиус оболочки,  $\omega_p$  — так называемый радиус поля моды [128]. Для сигнала режим распространения одномодовый,  $\omega_p^2 = 2 \int \psi(r) r dr$ , где  $\psi(r)$  — огибающая мода, используется для получения эффективной площади  $A_p^{eff} = \pi \omega_p^2$ . Пороговая мощность накачки  $(P_{th})$  и мощность насыщения сигнала  $(P_{sat})$  вычислялись как:  $P_{th} = \frac{h \nu_p}{\tau_n \sigma_p^2} \cdot \pi R^2$ ,  $P_{sat} = \frac{h \nu_s}{\tau (\sigma_s^2 + \sigma_p^2)} \cdot \pi \omega_p^2$ .

Используя отношение сечений  $\eta = \sigma_e^{s,p}/\sigma_a^{s,p}$  и относительную населенность  $n_i = N_i/N_{tot}$ , систему уравнений (5.2) можно представить в окончательном виде:

$$\begin{pmatrix} \frac{P_p}{P_{th}} & 0 & -1\\ \frac{1}{1+\eta} \frac{P_s}{P_{sat}} & -\left[\frac{\eta}{1+\eta} \frac{P_s}{P_{sat}} + 1\right] & \frac{\tau}{\tau_p} \beta \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1\\ n_2\\ n_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0\\ 0\\ 1 \end{pmatrix}$$
 (5.4)

Эволюция мощности накачки  $P_p$  и сигнала  $P_s^{\pm}$  по длине световода определялась скоростными уравнениями первого порядка:

$$\frac{dP_p}{dz} = -\sigma_a^p \cdot N_1 \cdot \Gamma_p \cdot P_p - \alpha_p^{BG} \cdot P_p = -(n_1 \cdot \alpha_p^{clad} + \alpha_p^{BG}) \cdot P_p$$

$$\frac{dP_s^+}{dz} = \{\sigma_e^s \cdot N_2 - \sigma_a^s \cdot N_1\} \cdot \Gamma_s \cdot P_s^+ - \alpha_s^{BG} \cdot P_s^+ =$$

$$= (\{\eta \cdot n_2 - n_1\} \cdot \alpha_s^{core} - \alpha_s^{BG}) \cdot P_s^+$$

$$\frac{dP_s^-}{dz} = \{\sigma_e^s \cdot N_2 - \sigma_a^s \cdot N_1\} \cdot \Gamma_s \cdot P_s^- + \alpha_s^{BG} \cdot P_s^- =$$

$$= (-\{\eta \cdot n_2 - n_1\} \cdot \alpha_s^{core} + \alpha_s^{BG}) \cdot P_s^-$$

$$(5.5)$$

где  $P_p$ ,  $P_s^+$  и  $P_s^-$  — мощности накачки, мощности сигналов в прямом (совпадает с направлением распространения накачки на длине волны 808 нм) и обратном направлении, соответственно;  $\alpha_p^{clad} = \sigma_a^p \cdot \Gamma_p \cdot N_{tot}$  и  $\alpha_s^{core} = \sigma_a^s \cdot \Gamma_s \cdot N_{tot}$  — поглощение (по оболочке) на длине волны накачки и поглощение (по сердцевине) на длине волны сигнала, соответственно;  $\Gamma_p$ ,  $\Gamma_s$  — соответствующие коэффициенты перекрытия огибающей моды с профилем легирования ВАЦ, которые для простоты считаются независимыми от мощности. Ненасыщаемые потери в сердцевине световода на длине волны накачки/сигнала обозначаются как  $\alpha_p^{BG}$ ,  $\alpha_s^{BG}$ . Уравнение (5.4) включает полную мощность сигнала как сумму мощностей сигналов прямого и обратного распространения  $P_s = P_s^+ + P_s^-$ . Для моделирования работы висмутового лазера с одним высокоотражающим зеркалом, а именно ВБР и выходным зеркалом ~4% системы уравнений (5.4) и (5.5) решались с использованием следующих граничных условий:

$$P_{p}(z=0) = \epsilon \cdot P_{0}$$

$$P_{s}^{+}(z=0) = P_{s}^{-}(z=0)$$

$$\frac{P_{s}^{-}(z=L)}{P_{s}^{+}(z=L)} \cdot 100\% = T_{\lambda}$$
(5.6)

где  $P_0$  — входная мощность накачки, L — длина световода,  $\epsilon$  — дискретные вносимые потери  $(0,5-2,5\,$  дБ), учитывающие неэффективность ввода мощности накачки в активный световод. Численное моделирование было выполнено с

использованием программного обеспечения, которое было создано с использованием Python, включающей библиотеки SciPy. Параметры, использованные при моделировании, приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные параметры и их обозначения, используемые для выполненного расчета.

Параметр	Обозначение	Величина P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -SiO <sub>2</sub>	Величина GeO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	
Радиус сердцевины, мкм	r	2,5	4	
Радиус оболочки, мкм	R	62,5	62,5	
Длина активного световода, м	L	200	232	
Ненасыщаемые потери $\lambda_s$ , дБ/м	$\alpha_s^{BG}$	0,038	0,02	
Ненасыщаемые потери $\lambda_p$ , дБ/м	$\alpha_p^{BG}$	1,25	2,0	
Активное поглощение $\lambda_s$ , дБ/м	$\alpha_s^{core}$	0,4	0,41	
Активное поглощение $\lambda_p$ , дБ/м	$\alpha_p^{core}$	4,8	5,8	
Поглощение накачки по оболочке, дБ/м	$\alpha_p^{clad}$	0,033	0,017	
Радиус поля моды, мкм	$\psi_s$	1,5	3,0	
Сечение поглощения $\lambda_p$ , пм <sup>2</sup>	$\sigma_a^p$	7,0	16,8	
Сечение поглощения $\lambda_s$ , пм <sup>2</sup>	$\sigma_a^s$	0,6	0,9	
Сечение излучения $\lambda_s$ , пм <sup>2</sup>	$\sigma_e^{s}$	2,2	2,3	
Время жизни ВАЦ на уровне Е3, мкс	$\tau_3 \equiv \tau_p$	5,0	45,0	
Время жизни ВАЦ на уровне Е2, мкс	$ au_2 \equiv  au$	700	600	
Коэффициент ветвления [129]	β	0,9	0,8	
$\lambda_s$ , HM	$\lambda_s$	793	808	
$\lambda_p$ , нм	$\lambda_p$	1360	1460	
Коэффициент отражения выходной ВБР, %	$T_{\lambda}$	4%	4%	

Приведенные значения сечений на длинах волн накачки и сигнала оценивались по методике, описанной в [97]. На рисунке 5.13 показаны результаты

выполненного численного моделирования. Как можно видеть, результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными для двух типов исследованных висмутовых лазеров. Таким образом, можно утверждать, что наблюдаемый эффект насыщения выходной мощности висмутового лазера связан с относительно длительным временем жизни ВАЦ-Si в возбужденном состоянии Е<sub>3</sub>. На рисунке 5.13 (б) показаны эволюция зависимостей выходной мощности висмутового лазера при длине волны 1460, если т<sub>р</sub> значения ВАЦ-Si будут отличаться от 5 до 85 мкс для соответствующего диапазона мощностей накачки. В этом случае все другие параметры оставались неизменными, чтобы обеспечить качественный сравнительный анализ влияния времени жизни ВАЦ-Si на уровне Е<sub>3</sub> на выходную мощность лазера. Можно видеть, что при тр менее 25 мкс, насыщение выходной мощности висмутового лазера становится незначительным, зависимость выходной мощности от введенной мощности накачки превращается в линейную функцию.

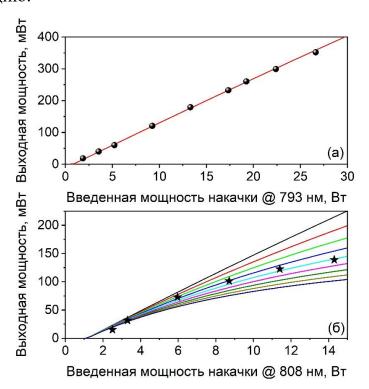


Рисунок 5.13 — Выходная мощность висмутового лазера в зависимости от мощности накачки: (а) на длине волны 1360 нм, связанной с лазерными переходами ВАЦ-Р; (б) на длине волны 1460 нм, связанной с лазерными переходами ВАЦ-Si. Эксперимент — символы; Расчет — строки. Результаты расчетов в (а) и (б) приведены при  $\tau_p = 5$  мкс и  $\tau_p = 5 - 85$  мкс с шагом 10 мкс соответственно.

Таким образом, что результаты расчетов указывают на тот факт, что насыщение выходной мощности можно частично преодолеть за счет сокращение времени жизни уровня ЕЗ. Это было продемонстрировано непосредственно в экспериментах. Для сокращения времени жизни ВАЦ-Si на уровне ЕЗ необходимо ускорить переход ВАЦ с ЕЗ на Е2. С этой целью была проведена серия экспериментов по двухволновой накачке с использованием тулиевого лазера с длиной волны, соответствующей энергии перехода ЕЗ →Е2, и многомодового диода накачки. Излучение от тулиевого лазера направлялось непосредственно в активную сердцевину световода. Диапазон перестройки длины волны работы тулиевого лазера был от 1930 до 2040 нм. Выходная мощность тулиевого лазера на всех длинах волн составляла ≈1,8–2 W. Зависимости выходной мощности висмутового лазера от мощности накачки на длине волны 808 нм, а также длины волны возбуждения тулиевого лазера представлены на рисунке 5.14 (а) и (б) соответственно.

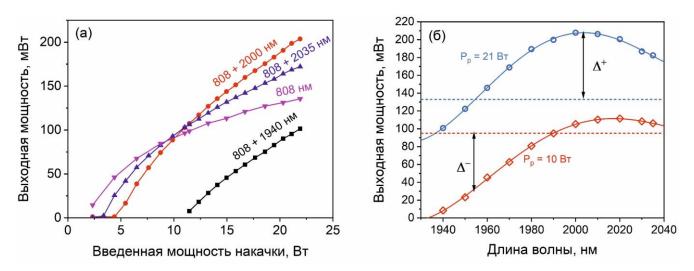


Рисунок 5.14 – (а) Выходная мощность висмутового лазера, работающего на длине волны 1460 нм, в зависимости от мощности введенной накачки на длине волны 808 нм (при двухволновой накачке для разных длин волн тулиевого лазера с выходной мощностью ≈2 Вт); (б) Выходная мощность висмутового лазера с накачкой различной мощности в зависимости от длины волны тулиевого лазера. Начальный уровень мощности висмутового лазера, когда тулиевый лазер был выключен, обозначен пунктирными линиями.

Использование тулиевого лазера в качестве источника накачки в двухволновой конфигурации приводило к следующим изменениям: 1) увеличение

пороговой мощности накачки (от 2 Вт до почти 10 Вт) в зависимости от используемой тулиевого 3) длины волны излучения лазера; рост дифференциальной эффективности висмутового лазера с ~1 до 2 % для высоких значений мощностей накачки; 3) тенденция к линейной зависимости выходной мощности от мощности накачки. Кратко обсудим полученные зависимости, характеризующие режим работы лазера, представлены на рисунке 5.14 (а) и (б). Сначала рассмотрим работу лазера при накачке оболочкой только на длине волны 808 нм. В этом случае верхний лазерный уровень (рисунок 5.11 и рисунок 5.13 (б)) заселяется за счет спонтанного процесса  $A_{32}$ , не зависящего от мощности накачки. В результате при работе лазера при более высоких мощностях накачки на длине волны 808 нм, то есть когда скорость накачки становится высокой,  $A_{32}$ становится узким местом, не позволяющим преобразовать высокую скорость накачки в высокую скорость вынужденного излучения  $W_{21}$ , что ограничивает выход мощность лазера (эффект насыщения). С помощью двухволновой накачки вынужденные переходы  $W_{23}$  и  $W_{32}$  могут доминировать над спонтанным переходом  $A_{32}$  при достаточной мощности тулиевого лазера. Зависимость выходной мощности висмутового лазера от рабочей длины волны тулиевого лазера, изображенная на рисунке 5.14 (б), может быть интерпретирована с точки зрения форм спектров и положения пиков сечений поглощения  $\sigma_a^{23}$  и излучения  $\sigma_e^{32}$  для переходов  $E_2 \rightarrow E_3$  и  $E_3 \rightarrow E_2$ , соответственно. Хотя информации о точных значениях сечений нет, можно предположить, что по аналогии с уровнями  $E_1$  и  $E_2$ эта пара характеризуется двумя колоколообразными спектрами:  $\sigma_a^{23}$  с максимумом на длине волны  $\approx 1900$  нм и  $\sigma_e^{32}$  максимум расположен на длине волны  $\approx 2000$  нм [18]. Если предположить, что распределение населенностей между уровнем 2 и уровнем 3 достигается мгновенно и определяется соотношением  $N_3/N_2 = \sigma_a^{23}/\sigma_e^{32}$ , то в зависимости от длины волны излучения тулиевого лазера имеем следующие случаи:

- 1) на коротких длинах волн работы тулиевого лазера (например, на длине волны 1940 нм, где  $\sigma_a^{23} \gg \sigma_e^{32}$ ) достигается  $N_3 \gg N_2$ , что сопровождается заметным увеличением порога генерации (рисунок 5.14 а);
- 2) при длинноволновой генерации тулиевого лазера (например, при 2000 нм, где  $\sigma_a^{23} < \sigma_e^{32}$ ) соотношение  $N_3/N_2$  становится в пользу  $N_2$  и существенно снижается пороговые значения накачки для достижения лазерной генерации. Однако, поскольку  $\sigma_a^{23} \neq 0$ , порог генерации все равно должен быть выше, чем в случае, когда тулиевый лазер выключен и заселенность уровня 2 определяется спонтанным процессом с уровня 3 (только при накачке на 808 нм). Также в этом случае наблюдается приближение кривой, описывающей зависимость выходной мощности висмутового лазера от вводимой мощности накачки, к линейной функции (рисунок 5.14 а). Как видно на рисунке 5.14 (б), максимальное увеличение выходной мощности почти в два раза (до  $\approx 210$  мВт) происходит при мощности накачки  $\approx 20$  Вт;
- 3) при работе тулиевого лазера на длинах волн, например, 2035 нм ( $W_{32} \approx A_{32}$ ) снова важную роль начинает играть спонтанный процесс. В этом случае получаем промежуточный случай между накачкой тулиевого лазера на более короткой длине волны и отсутствием накачки тулиевого лазера вообще.
  - 5.5. Висмутовые волоконные усилители для O-(1260 1360 нм), E-(1360 1460 нм), S-(1460 1530 нм) диапазонов с многомодовой накачкой

В данном разделе представлены пионерские результаты по разработке и изучению характеристик висмутовых усилителей с накачкой оболочкой, работающих в диапазонах О, Е и S-телекоммуникационных диапазонах, использующие различные типы висмутовых световодов в качестве активной среды.

#### Висмутовые усилители О-диапазона

Первоначально были изучены характеристики висмутового усилителя Одиапазона на основе световода с фосфоросиликатной сердцевиной, легированной висмутом. На рисунке 5.15 показаны спектры усиления и шум-фактора усилителя, собранного на основе 200-м отрезка активного световода. Пиковое усиление (G<sub>max</sub>) 29 дБ на длине волны 1,33 мкм и наименьший коэффициент шума  $\approx 5.5$  дБ достигались для усилителя при накачке на длине волны 793 нм и выходной мощностью 14,5 Вт (для попутной накачки). Ширина полосы усиления ( $\Delta\lambda_{1/2}$ ) по уровню -3 дБ составляла почти 50 нм. Форма измеренного спектра усиления несимметрична присутствия длинноволновой из-за полосы усиления, происходящей от ВАЦ-Si. Как хорошо видно, при встречной накачке имеет место заметное снижение выходных характеристик исследуемых усилителей по сравнению с прямой (при этом Gmax  $\approx 27$  дБ и NF  $\approx 6.5$  дБ являются лучшими значениями, достигаемыми при встречной накачке). Такой результат был ожидаемым с учетом численного расчетного анализа активных волоконных усилителей аналогичной конфигурации [130].

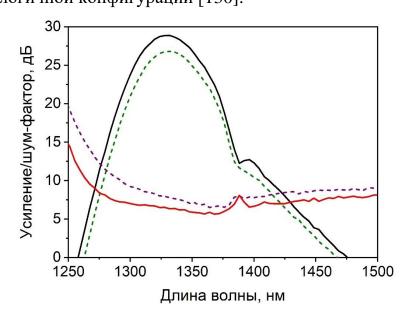


Рисунок 5.15 — Спектры усиления и шум-фактора усилителя О-диапазона с накачкой оболочкой со встречной (штриховая) и попутной (сплошная) конфигурациями накачки.

#### Висмутовые усилители Е- и S-диапазона

Спектры усиления и шум-фактора разработанного висмутового усилителя Едиапазона на основе световода с германосиликатной сердцевиной, легированной висмутом, представлены на рисунке 5.16. Видно, что пик усиления при накачке на 808 нм расположен на длине волны 1450 нм. Значение  $G_{max}$  составляет 32 дБ при  $\Delta\lambda_{1/2}=40\,$  нм. Можно наблюдать существенную разницу в шум-факторе для исследованных конфигураций. В частности, для встречной накачки шум-фактора относительно высок: более 10 дБ, хотя заметно снижается до 5,5 дБ в длинноволновой области. В то же время при попутной накачке шум-фактор составляет около 7 дБ (по пиковому усилению), а его минимальное значение  $\approx 5,2\,$  дБ. Кроме того, были измерены спектры усиления при накачке в оболочку на длине волны 793 нм. При этом было замечено значительное уменьшение  $G_{max}$  и сдвиг максимума в длинноволновую сторону: на 1460 нм при встречной накачке и 1470 нм при попутной накачке. Такое поведение обусловлено изменением инверсной населенностей ВАЦ-Si по длине световода и, как следствие, выраженным эффектом перепоглощения, вызванным невозбужденными ВАЦ.

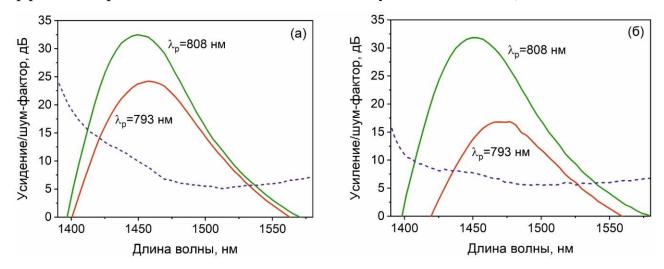


Рисунок 5.16 – Спектры усиления (сплошная линия) и шум-фактора (штриховая линия) Едиапазона висмутового усилителя с накачкой многомодовым ЛД на длине волны 808 нм с выходной мощностью 14,5 Вт: (а) встречная накачка; (б) попутная накачка. Кроме того, для сравнения показаны спектры усиления разработанного висмутового усилителя при накачке в оболочку на длине волны 793 нм для каждой конфигурации накачки.

### О+Е+Ѕ-диапазон висмутовых усилителей.

Как упоминалось выше, в фосфосиликатном стекле могут сосуществовать типа ВАЦ (ВАЦ-Si и ВАЦ-Р). Используя висмутовый различных фосфоросиликатной световод с W- дизайном, был разработан накачиваемый по оболочке висмутовый усилитель с шириной полосы усиления более 110 нм, полученной в результате совместного вклада различных ВАЦ, а именно перекрывающихся полос ВАЦ -Si и ВАЦ -P. В конфигурации с накачкой по оболочке также были успешно решены вопросы по устранению неравномерности усиления в относительно широком спектральном диапазоне от 1330 до 1450 нм (ширина  $\sim 120$  нм по уровню -3 дБ), как показано на рисунке 5.17, что привело к получению плоского контура усиления. Видно, что обе конфигурации усилителя характеризуются высоким уровнем усиления более 25 дБ. Для встречной конфигурации было обнаружено, что излучение накачки на 793 нм способно возбуждать оба вида ВАЦ, обеспечивая тем самым усиление в коротковолновой и длинноволновой части спектра. При накачке на 808 нм можно наблюдать только отчетливую полосу усиления ВАЦ-Si. Профиль усиления висмутового усилителя с улучшенной спектральной равномерностью усиления достигается комбинированной накачке на длинах волн 793 и 808 нм, как видно на рисунке 5.17.

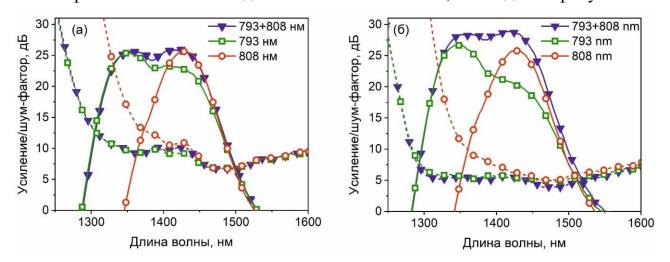


Рисунок 5.17 – Спектры усиления и шум-фактор для висмутового усилителя на основе фосфоросиликатного световода с W-дизайном при различных длинах волн накачки 793 нм и 808 нм: а – встречная, б – попутная накачка.

Что шум-фактора, TO было обнаружено, касается значения что спектры шум-фактора сильно экспериментально полученные используемой длины волны накачки и конфигурации волоконного усилителя. При накачке на 793 нм и при комбинированной накачке на 793+808 нм в исследованных конфигурациях спектры шум-фактора относительно плоские по сравнению со спектрами при накачке только на 808 нм, где шум-фактор в коротковолновой области λ<1370 нм довольно высокий. Наименьший шум-фактор ~5 дБ во всей спектральной области, охватывающей O+E+S-телекоммуникационные диапазоны, был достигнут в усилителе с попутной накачкой.

Полученные результаты показывают, что использование соответствующего типа висмутового световода в сочетании с методом накачки по оболочке может обеспечить разработку висмутового усилителя, предназначенных для покрытия О-, Е- и S-диапазонов телекоммуникаций с очень перспективными характеристиками, такими как высокий пик усиления ~25 -35 дБ и низкий коэффициент шума ~5-6 дБ.

Сравнительный анализ рабочих характеристик висмутовых усилителей с одно- и многомодовой накачкой представлен в таблице 5.2, где приведены основные параметры существующих висмутовых усилителей, полученными на данный момент. Видно, что большинство представленных параметров, в том числе и длина активного световода, для рассматриваемых висмутовых усилителей сопоставимы, а наблюдаемые отклонения следует отнести к особенностям измерительных установок, используемых конфигураций усилителей и задействованных оптических компонентов.

Тем не менее, определенным недостатком висмутовых усилителей с накачкой по оболочке является относительно высокая потребляемая мощность накачки ~15 Вт, необходимая для обеспечения достаточного коэффициента усиления. Однако следует отметить, что параметры висмутового усилителя с одномодовой накачкой близки к потенциально достижимому пределу, в то время, как результаты для висмутового усилителя с накачкой в оболочке являются лишь первым шагом, что позволяет надеяться на дальнейшее улучшение их выходных

параметров за счет оптимизации конструкции световодов и конфигурации соответствующих устройств.

Таблица 5.2 – Основные результаты, достигнутые в области разработки висмутовых усилителей с одно- и многомодовой накачкой.

	Другие научные группы (накачка в сердцевину)			Научная группа НЦВО РАН		Данная работа (накачка в			
				(накачка в			оболочку)		
				сердцевину)					
Спектральный	O [81]	О+Е	Е	O [79]	О+Е	E [7]	O	О+Е	Е
диапазон		[90]	[16]		[89]				
Параметр									
Пиковое усиление, дБ	~29	~30	~30	25-30	~30	~30	~29	~25	~32
Шум-фактор, дБ	< 5.5	5-7	~5	5-6	~5,5	5,3	~6,5	5	5,5
Ширина на полувысоте, нм	~40	80	30-50	40	116	40	~50	120	~40
Длина световода, м	75-100	220	320	140	150	120	200	205	200

#### 5.6. Выводы к Главе

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1) Впервые предложен и экспериментально реализован принцип получения лазерной генерации на переходах висмутовых активных центров, ассоциированных с кремнием (ВАЦ-Si), в трехуровневой схеме, что привело к интенсивным исследованиям в области разработки висмутовых лазеров и усилителей с накачкой по внутренней кварцевой оболочке. В результате проведенных исследований была продемонстрирована принципиальная возможность создания таких устройств, что в дальнейшем привело к реализации серии полностью волоконных оптических

устройств (лазеров и усилителей) для области длин волн 1300 – 1500 нм на основе висмутовых германосиликатных (G-дизайн) и фосфоросиликатных (W-дизайн) световодов с использованием многомодовой диодной накачки на длинах волн 793 и 808 нм. Проведены детальные исследованиям по изучению особенностей работы таких устройств, что привело к получению характерных зависимостей выходных характеристик лазеров от параметров резонатора (длина активного световода, коэффициент отражения зеркал и др.), а также от дизайна световода, в частности, формы внутренней кварцевой оболочки активного световода и соотношения размеров сердцевины и оболочки. В результате было показано, что висмутовые лазеры такого типа способны генерировать оптическое излучение в указанном диапазоне длин волн с максимальной эффективностью до 5% при использовании радиально-несимметричных форм оболочки. Кроме того, было осуществлена реализация лабораторных макетов усилителей, показывающих высокие пиковые значения усиления >25-30 дБ и относительно низкими коэффициентами шума 5-6 дБ в О-, Е- и S- телекоммуникационных диапазонах. Комбинирование длин волн накачки для возбуждения различных типов активных центров висмутовых фосфоросиликатных световодов W-дизайна позволило достичь рекордных значений ширины (по уровню –3 дБ) спектра усиления >120 нм при вариациях усиления <2 дБ. Разработанные устройства не уступают (по большинству параметров) лучшим аналогам с одномодовой накачкой, однако являются более экономически эффективными. Результаты проведенного исследования открывают новые возможности для использования висмутовых световодов, как ключевого элемента готовых к работе волоконно-оптических устройств для различных практических приложений.

2) В рамках данного исследования также были получены результаты фундаментального характера, в частности, проведено теоретическое и экспериментальное исследование обнаруженного эффекта насыщения выходной мощности висмутовых лазеров с накачкой по оболочке, что свойственно для ВАЦ-Si, в отличие от ВАЦ-P. Предложенная численная модель полностью описывала основные особенности работы лазеров на переходах ВАЦ-P и ВАЦ-Si, которые

наблюдались в экспериментах. В итоге было установлено, что основное ограничение роста выходной мощности (эффект насыщения) вызвано медленной релаксацией ВАЦ-Si с вышерасположенного возбужденного уровня метастабильный (лазерный) уровень. Из выполненных расчетов было установлено, что при возрастании скорости (сокращении времени) релаксации эффект насыщения выходной мощности может быть частично преодолен, т.е. зависимости выходной мощности от поглощаемой мощности накачки становятся близки к виду линейной функции. Это было экспериментально продемонстрировано путем создания условий для более эффективного заселения лазерного уровня, которые были достигнуты за счет использования дополнительного лазерного излучения в диапазоне длин волн 1930 – 2040 нм, которое повышало вероятность вынужденных переходов ВАЦ с вышерасположенного уровня на лазерный уровень. Установлено, что при выборе оптимальных условий такой подход позволяет увеличить мощность выходного излучения почти вдвое.

#### Заключение

На основании результатов исследований, проведенных в рамках данной диссертационной работы, можно сделать следующие основные выводы:

- 1) Определен коэффициент конверсии ионов висмута в висмутовые активные центры (Ві→ВАЦ), который составил от 10 до 35%, в волоконных световодах с сердцевиной из германосиликатного стекла, легированного висмутом, с различным радиальным распределением легирующих (активных и неактивных) добавок. Установлено, что помимо концентрации ионов висмута существенное влияние на коэффициент конверсии Ві→ВАЦ оказывает химический состав стекла сердцевины, а именно концентрация и распределение GeO₂. На основе висмутового световода с ограниченным (центральная область) легированием сердцевины реализован волоконный лазер на длине волны 1460 нм с рекордной (для висмутовых лазеров) дифференциальной эффективностью ≈80%.
- 2) Обнаружен эффект фотообесцвечивания ВАЦ в световодах с сердцевиной из фосфоросиликатного стекла, легированного висмутом. Показано, что деградация ВАЦ происходит при воздействии видимого и ИК лазерного излучения, а ее интенсивность растет с увеличением температуры до 300-600 °C. Определены средние значения (1,24-1,98 эВ) и распределения энергий активации процессов фотообесцвечивания ВАЦ, ассоциированных с фосфором (ВАЦ-Р). Экспериментально установлено, что скорость протекания процессов, приводящих к фотообесцвечиванию ВАЦ-Р, заметно выше для световода с W-дизайном по сравнению со стандартным световодом (со ступенчатым профилем показателя преломления).
- 3) Продемонстрирована принципиальная возможность получения оптического усиления и лазерной генерации в ближней ИК области на основе висмутовых германосиликатных световодов (G-дизайна), характеризующихся рекордно низким уровнем ненасыщаемого поглощения <2% от общего уровня вблизи основного пика поглощения ВАЦ-Si, с использованием многомодовой диодной накачки на 808 нм. В результате было показано, что висмутовые лазеры такого

- типа способны генерировать оптическое излучение в области длин волн 1400 1500 нм с максимальной эффективностью до 5% (при создании радиальнонесимметричной формы внутренней оболочки).
- 4) Обнаружен эффект насыщения выходной мощности лазерной генерации на переходах ВАЦ-Si при возбуждении на длине волны 808 нм. Установлено, что основное ограничение роста выходной мощности вызвано медленной релаксацией ВАЦ-Si с вышерасположенного возбужденного уровня на метастабильный (лазерный) уровень. Продемонстрировано, что заселение лазерного уровня за счет вынужденных переходов ВАЦ-Si при использовании дополнительного лазерного излучения в диапазоне длин волн 2000 2040 нм способствует частичному преодолению насыщения, т.е. зависимости выходной мощности лазерной генерации становятся близки к виду линейной функции, а мощность выходного излучения возрастает почти вдвое.

#### Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Таким результаты образом, исследований позволили выявить закономерности формирования ВАЦ, информацию a также получить возможностях оптимизации дизайна световодов такого типа и их потенциальных возможностях с точки зрения практической направленности. Это создает предпосылки к поиску новых конструкций различного типа висмутовых световодов, обладающих заданными свойствами. В рамках данного исследования были обнаружены фотохимические процессы в стеклообразных материалах, которые характерны не только для изучаемого объекта исследования (висмутовые световоды), но и, вероятно, для всего класса лазерно-активных материалов на основе стеклянных световодов. Дальнейшие исследования в этом направлении представляются крайне перспективными и многообещающими, поскольку известно, что фотохимические процессы (фотообесцвечивание, фотопотемнение и др.) могут оказывать влияние на стабильность и продолжительность работы волоконно-оптических устройств. Кроме того, в данной работе впервые реализованы оригинальные оптические устройства на основе висмутовых

световодов с многомодовой диодной накачкой, что крайне перспективно с точки зрения продвижения в создании недорогих, компактных висмутовых волоконных лазеров и усилителей высокой мощности, работающих в ближней ИК-области.

В целом, направление по разработке и изучению оптических свойств висмутовых световодов, является крайне актуальным, особенно с практической точки зрения, поскольку такие материалы играют ключевую роль в построении высокоскоростных систем связи нового поколения, в том числе 5G и 6G технологии, основанных на расширении спектральной полосы передачи данных. Данное направление активно развивается в мире, что подтверждается интересом, публикациями и созданием коммерческих продуктов со стороны ведущих научно-исследовательских институтов и компаний в области разработки инновационных решений и коммерческих систем для телекоммуникационной индустрии.

#### Список используемых сокращений

ВАЦ – висмутовый активный центр

ВАЦ-АІ - висмутовый активный центр, ассоциированный с алюминием

ВАЦ-Ge - висмутовый активный центр, ассоциированный с германием

ВАЦ-Р - висмутовый активный центр, ассоциированный с фосфором

ВАЦ-Si - висмутовый активный центр, ассоциированный с кремнием

ВБР – волоконная брэгговская решетка

ВКР – вынужденное комбинационное рассеяние

ВРМ - волнодисперсионный рентгеновский микроанализ

ИК – инфракрасный

КПД – коэффициент полезного действия

ЛД – лазерный диод

ППП – профиль показателя преломления

РЗЭ – редкоземельные элементы

MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) – модифицированное химическое парофазное осаждение

EPMA (Electron Probe Micro-Analyzer) – электронно-зондовый микроанализ

FCVD (Furnace Chemical Vapor Deposition) – метод печного химического осаждения из газовой фазы

VAD (Vapor-phase Axial Deposition) – аксиальное газофазное осаждение

OVD (Outside Vapor Deposition) – внешнее газофазное осаждение

SPCVD (surface plasma chemical vapor deposition) — поверхностное плазмохимическое осаждение из газовой фазы

WDM (Wavelength-Division Multiplexer) – спектрально-селективный волоконный разветвитель

#### Список литературы

- 1 Winzer, P. J. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years / P. J. Winzer, D. T. Neilson, A. R. Chraplyvy // Optics express. 2018. Vol. 26. Issue 18. P. 24190-24239.
- 2 CW bismuth fibre laser / E.M. Dianov, V.V. Dvoyrin, V.M. Mashinsky [et al.] // Quantum Electronics. 2005. Vol. 35. Issue 12. C. 1083.
- 3 Absorption, fluorescence and optical amplification in MCVD bismuth-doped silica glass optical fibres / V.V. Dvoyrin, V.M. Mashinsky, E.M. Dianov [et al.] // 2005 31st European Conference on Optical Communication, ECOC 2005. IET, 2005. Vol. 4. C. 949-950.
- 4 Курков, А.С. Эрбиевые волоконно-оптические усилители/ А.С. Курков, О.Е. Наний // Lightwave russian edition. -2003. Т. 1. С. 14-21.
- 5 Experimental demonstration of single-span 100-km O-band 4× 50-Gb/s CWDM direct-detection transmission / Y. Hong, N. Taengnoi, K.R.H. Bottrill [et al.] // Optics Express. 2022. Vol. 30. Issue 18. P. 32189-32203.
- 6 Simple broadband bismuth doped fiber amplifier (BDFA) to extend O-band transmission reach and capacity / V. Mikhailov, M.A. Melkumov, D. Inniss [et al.] // Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2019. P. M1J. 4.
- 7 E-band data transmission over 80 km of non-zero dispersion fibre link using bismuth-doped fibre amplifier / M.A. Melkumov, V. Mikhailov, A.M. Hegai [et al.] // Electronics Letters. 2017. Vol. 53. Issue 25. P. 1661-1663.
- 8 30-GBaud DP 16-QAM transmission in the E-band enabled by bismuth-doped fiber amplifiers / A. Donodin, M. Tan, P. Hazarika [et al.] // Optics Letters. 2022. Vol. 47. Issue 19. P. 5152-5155.
- 9 Performance evaluation of praseodymium doped fiber amplifiers / J. Mirza, S. Ghafoor, N. Habib [et al.] // Optical Review. 2021. Vol. 28. Issue 6. P. 611-618.

- 10 Husein, A.H.M. Noise figure and gain temperature dependent of praseodymium-doped fiber amplifier by using rate equations / A.H.M. Husein, F.I. El-Nahal // Optics communications. 2010. Vol. 283. Issue 3. P. 409-413.
- 11 Prakash, A. Distributed Raman Amplifier in O, E, S, C & L Band DWDM Network / A. Prakash, S. Roy // International Conference on Optical and Wireless Technologies. Singapore: Springer Nature Singapore, 2021. P. 263-271.
- 12 Khalaf, A. A. M. Raman amplifier performance under new wavelength ranges / A.A.M. Khalaf, F. M. Mustafa // Journal of Optical Communications. 2016. Vol. 37. Issue 1. P. 9-21.
- 13 Impact analysis on performance optimization of the hybrid amplifier (RA+ EDFA) / J.G. Yuan, T.Y. Liang, W. Wang, S. Gu // Optik. 2011. Vol. 122. Issue 17. P. 1565-1568.
- 14 VIAVI Solutions: офиц. сайт. Сан-Хосе. URL: <a href="https://www.viavisolutions.com/en-uk/products/map-o-band-optical-fiber-amplifier-mofa-c1">https://www.viavisolutions.com/en-uk/products/map-o-band-optical-fiber-amplifier-mofa-c1</a> (дата обращения: 27.02.2024)
  15 High power BDF/EDF hybrid amplifier providing 27 dB gain over 90 nm in the E+ S band / F. Maes, M. Sharma, L. Wang, Z. Jiang // Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2022. P. Th4C. 8.
- 16 Bismuth doped fibre amplifier operating in E-and S-optical bands / A. Donodin, V. Dvoyrin, E. Manuylovich [et al.] // Optical Materials Express. 2021. Vol. 11. Issue 1. P. 127-135.
- 17 Wideband bismuth-and erbium-codoped optical fiber amplifier for C+ L+ U-telecommunication band / S.V. Firstov, K.E. Riumkin, A.M. Khegai [et al.] // Laser Physics Letters. 2017. Vol. 14. Issue 11. P. 110001.
- 18 A 23-dB bismuth-doped optical fiber amplifier for a 1700-nm band / S.V. Firstov, S.V. Alyshev, K.E. Riumkin [et al.] // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. Issue 1. P. 28939.
- 19 Fujimoto, Y.F.Y. Infrared luminescence from bismuth-doped silica glass / Y.F.Y. Fujimoto, M.N.M. Nakatsuka // Japanese Journal of Applied Physics. 2001. Vol. 40. Issue 3B. P. L279.

- 20 Near infrared broadband emission of bismuth-doped aluminophosphate glass / X.-G. Meng, J.-R. Qiu, M.-Y. Peng [et al.] // Opt. Express. 2005. Vol. 13. Issue 5. P. 1628–1634.
- 21 Дианов, Е.М. О природе Ві-центров в стекле, излучающих в ближней ИК области спектра / Е.М. Дианов // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 4. С. 283—285.
- 22 Photoluminescence characteristics of Bim+-doped silica optical fiber: Structural model and theoretical analysis / J. Wen, T. Wang, F. Pang [et al.] // Jpn. J. Appl. Phys. 2013. Vol. 52. Issue 12. P.122501.
- 23 Discussion on the origin of NIR emission from Bi-doped materials / M. Peng, G. Dong, L. Wondraczek [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids. 2011. Vol. 357. Issue 11-13. P. 2241-2245.
- 24 Optical spectroscopy of bismuth-doped pure silica fiber preform / I. Razdobreev, H. El Hamzaoui, V.Yu. Ivanov [et al.] // Optics letters. 2010. Vol. 35. Issue 9. P. 1341-1343.
- 25 Optical properties of Bismuth-doped silica core photonic crystal fiber / I. Razdobreev, H. El Hamzaoui, L. Bigot [et al.] // Optics express. 2010. Vol. 18. Issue 19. P. 19479-19484.
- 26 Nagel, S.R. An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance / S.R. Nagel, J.B. MacChesney, K.L. Walker // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1982. Vol. 30. Issue 4. P. 305-322.
- 27 Silica-based bismuth-doped fiber for ultra broad band light-source and optical amplification around 1.1  $\mu$ m / T. Haruna, M. Kakui, T.A.R.U. Toshiki [et al.] // Optical Amplifiers and Their Applications. Optica Publishing Group, 2005. P. MC3.
- 28 Спектральные проявления висмутовых центров на разных стадиях процесса FCVD / А.С. Зленко, В.М. Машинский, Л.Д. Исхакова [и др.] // Квантовая электроника. 2013. Vol. 43. №. 7. С. 656-665.
- 29 Гурьянов А.Н. Получение волоконных световодов и исследование их характеристик / учеб. пособие; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. Н. Новгород, 2014. С. 82.

- 30 Absorption, gain, and laser action in bismuth-doped aluminosilicate optical fibers. / V.V. Dvoyrin, A.V. Kir'yanov, V.M. Mashinsky [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2009. Vol. 46. Issue 2. P. 182-190.
- 31 The influence of the MCVD process parameters on the optical properties of bismuth-doped phosphosilicate fibers / A.M. Khegai, F.V. Afanasiev, Y.J. Ososkov [et al.] // Journal of lightwave technology. 2020. Vol. 38. Issue 21. C. 6114-6120.
- 32 Bismuth-doped fibers and fiber lasers for a new spectral range of 1600-1800 nm / E.M. Dianov, S.V. Firstov, V.F. Khopin [et al.] // Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications. SPIE, 2016. Vol. 9728. P. 179-184.
- 33 Effect of drawing conditions on optical properties of bismuth-doped high-GeO2-SiO2Fibers / S.V. Firstov, A.E. Levchenko, A.V. Kharakhordin [et al.] // IEEE Photonics Technol. Lett. 2020. Vol. 32. Issue 15. P. 913–916
- 34 Trukhin, A. Intra-center and recombination luminescence of bismuth defects in fused and unfused amorphous silica fabricated by SPCVD / A. Trukhin, J. Teteris, A. Bazakutsa, K. Golant // Journal of non-crystalline solids. 2013. Vol. 363. C. 187-192.
- 35 A wide range optical amplification in 1.3–1.5 micron with Bi-doped silica fiber / S. Kobayashi, M. Takahashi, M. Ohara [et al.] // 2015 International Conference on Photonics in Switching (PS). IEEE, 2015. P. 151-153.
- 36 Broadband optical amplification with water-free hexagonal double-clad Bi doped silica fiber / S. Kobayashi, M. Takahashi, M. Ohara [et al.] // Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications. SPIE, 2016. Vol. 9728. P. 338-343.
- 37 Bismuth-doped multicomponent optical fiber fabricated by melt-in-tube method / Z. Fang, S. Zheng, W. Peng [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. 2016. Vol. 99. Issue 3. P. 856-859.
- 38 10.6 dB gain at a 1310 nm wavelength for a bismuth-doped silica fiber amplifier / Y.S. Seo, R. Sasahara, Y. Fujimoto [et al.] // Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. Optica Publishing Group, 2007. P. FE2\_2.

- 39 Seo, Y.S. 9.6 dB Gain at a 1310 nm Wavelength for a Bismuth-doped Fiber Amplifier / Y.S. Seo, C.H. Lim, Y. Fujimoto, M. Nakatsuka // Journal of the Optical Society of Korea. 2007. Vol. 11. Issue 2. P. 63-66.
- 40 Optical gain and laser generation in bismuth-doped silica fibers free of other dopants / I.A. Bufetov, M.A. Melkumov, S.V. Firstov [et al.] // Optics letters. 2011. Vol. 36. Issue 2. P. 166-168.
- 41 Peng, M. Generation of emission centers for broadband NIR luminescence in bismuthate glass by femtosecond laser irradiation / M. Peng, Q. Zhao, J. Qiu, L. Wondraczek // Journal of the American Ceramic Society. 2009. Vol. 92. Issue 2. P. 542-544.
- 42 Ehrt, D. Structure, properties and applications of borate glasses / D. Ehrt // Glass technology. 2000. Vol. 41. Issue 6. P. 182-185.
- 43 Bi-doped optical fibers and fiber lasers / I.A. Bufetov, M.A. Melkumov, S.V. Firstov [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2014. Vol. 20. Issue 5. P. 111-125.
- 44 Laguta, A. V. A magneto-optical study of bismuth-doped MgO–Al2O3–SiO2 glass: on the nature of near-infrared luminescence / A. V. Laguta, B.I. Denker, S.E. Sverchkov, I.M. Razdobreev // Quantum Electronics. 2017. Vol. 47. Issue 2. P. 123.
- 45 Combined excitation-emission spectroscopy of bismuth active centers in optical fibers / S.V. Firstov, V.F. Khopin, I.A. Bufetov [et al.] // Optics express. 2011. Vol. 19. Issue 20. P. 19551-19561.
- 46 Luminescence properties of IR-emitting bismuth centres in-based glasses in the UV to near-IR spectral region / E.G. Firstova, I.A. Bufetov, V.F. Khopin [et al.] // Quantum Electronics. 2015. Vol. 45. Issue 1. P. 59.
- 47 Anti-Stokes luminescence in Bismuth-doped silica and germania-based fibers / S.V. Firstov, V.F. Khopin, V.V. Velmiskin [et al.] // Optics express. 2013. Vol. 21. Issue 15. P. 18408-18413.
- 48 Sokolov, V.O. The origin of near-IR luminescence in bismuth-doped silica and germania glasses free of other dopants: First-principle study / V.O. Sokolov, V.G.

- Plotnichenko, E.M. Dianov // Optical Materials Express. 2013. Vol. 3. Issue 8. P. 1059-1074.
- 49 Bufetov, I. A. Bi-doped fiber lasers / I.A. Bufetov, E.M. Dianov // Laser physics letters. 2009. Vol. 6. Issue 7. P. 487.
- 50 Bismuth valence states and emission centers in Mg-Al-silicate glass / B.I. Denker, B.I. Galagan, I.L. Shulman [et al.] // Applied Physics B. 2011. Vol. 103. P. 681-685.
- 51 Sun, H.T. Recent advances in bismuth activated photonic materials / H.T. Sun, J. Zhou, J. Qiu // Progress in Materials Science. 2014. Vol. 64. P. 1-72.
- 52 On the nature of photoluminescence in Bismuth-doped silica glass / O.V. Laguta, H.E. Hamzaoui, M. Bouazaoui [et al.] // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. Issue 1. P. 3178.
- 53 Ding, M. Reversible photo-bleaching effect in a bismuth/erbium co-doped optical fiber under 830 nm irradiation / M. Ding, S. Wei, Y. Luo, G.D. Peng // Optics letters. 2016. Vol. 41. Issue 20. P. 4688-4691.
- 54 Photo-bleaching mechanism of the BAC-Si in bismuth/erbium co-doped optical fibers / M. Ding, J. Fang, Y. Luo [et al.] // Optics Letters. 2017. Vol. 42. Issue 24. P. 5222-5225.
- 55 Laser-induced bleaching and thermo-stimulated recovery of luminescent centers in bismuth-doped optical fibers / S.V. Firstov, S.V. Alyshev, A.V. Kharakhordin [et al.] // Optical Materials Express. 2017. Vol. 7. Issue 9. P. 3422-3432.
- 56 Laser-active fibers doped with bismuth for a wavelength region of 1.6–1.8  $\mu m$  / S.V. Firstov, S.V. Alyshev, K.E. Riumkin [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2018. Vol. 24. Issue 5. P. 1-15.
- 57 Recovery of IR luminescence in photobleached bismuth-doped fibers by thermal annealing / S.V. Firstov, E.G. Firstova, S.V. Alyshev [et al.] // Laser Physics. 2016. Vol. 26. Issue 8. P. 084007.
- 58 Photostability of laser-active centers in bismuth-doped GeO 2–SiO 2 glass fibers under pumping at 1550 nm / S.V. Alyshev, A.V. Kharakhordin, E.G. Firstova [et al.] // Optics Express. 2019. Vol. 27. Issue 22. P. 31542-31552.

- 59 Thermal stability of bismuth-doped high-GeO2 fiber lasers / S.V. Alyshev, A.V. Kharakhordin, A.M. Khegai [et al.] // Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications II. SPIE, 2020. Vol. 11357. P. 126-135.
- 60 Analysis of thermally activated processes in bismuth-doped GeO 2-SiO 2 glass fibers using the demarcation energy concept / A.V. Kharakhordin, S.V. Alyshev, E.G. Firstova [et al.] // Optical Materials Express. 2019. Vol. 9. Issue 11. P. 4239-4246.
- 61 Алышев С.В. Волоконные световоды на основе кварцевого стекла, легированного висмутом или теллуром, лазерные среды для спектральной области 1550 1800 нм // Диссертация, кандидат физ.-мат. наук: 2016. С. 123 62 Непрерывный висмутовый волоконный лазер / Е.М. Дианов, В.В. Двойрин, В.М. Машинский [и др.] // Квантовая электроника. 2005. Vol. 35. №. 12. С. 1083-
- 63 Dvoyrin, V.V. Efficient bismuth-doped fiber lasers / V.V. Dvoyrin, V. M. Mashinsky, E.M. Dianov // IEEE journal of quantum electronics. 2008. Vol. 44. Issue 9. P. 834-840.

1084.

- 64 Bismuth-doped optical fibers and fiber lasers for a spectral region of 1600–1800 nm / S.V. Firstov, S.V. Alyshev, M.A. Melkumov [et al.] // Opt. Lett. 2014. Vol. 39. Issue 24. P. 6927.
- 65 Watt-level, continuous-wave bismuth-doped all-fiber laser operating at 1.7  $\mu$ m / S.V. Firstov, S.V. Alyshev, K.E. Riumkin [et al.] // Optics letters. 2015. Vol. 40. Issue 18. P. 4360-4363.
- 66 Висмутовые волоконные лазеры, генерирующие в диапазоне 1470—1550 нм / Е.М. Дианов, С.В. Фирстов, В.Ф. Хопин [и др.] // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. №. 4. С. 299-301.
- 67 Formation of laser-active centers in bismuth-doped high-germania silica fibers by thermal treatment / S.V. Firstov, A.V. Kharakhordin, S.V. Alyshev [et al.] // Optics express. 2018. Vol. 26. Issue 10. C. 12363-12371.
- 68 Efficient Bi-doped fiber lasers and amplifiers for the spectral region 1300-1500 nm / I.A. Bufetov, S.V. Firstov, V.F. Khopin [et al.] // Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications. SPIE, 2010. Vol. 7580. P. 288-296.

- 69 High-power cw 1.27  $\mu$ m Bi-doped fiber laser / I.A. Bufetov, A.V. Shubin, S.V. Firstov [et al.] // The European Conference on Lasers and Electro-Optics. Optica Publishing Group, 2011. P. CJ8\_2.
- 70 Bismuth-doped silica-based fiber lasers operating between 1389 and 1538 nm with output power of up to 22 W / A.V. Shubin, I.A. Bufetov, M.A. Melkumov [et al.] // Optics Letters. 2012. Vol. 37. Issue 13. P. 2589-2591.
- 71 Optical amplification in 1430–1495 nm range and laser action in Bi-doped fibers / V.V. Dvoyrin, O.I. Medvedkov, V.M. Mashinsky [et al.] // Optics Express. 2008. Vol. 16. Issue 21. C. 16971-16976.
- 72 Bi-doped fiber lasers and amplifiers for a spectral region of 1300–1470 nm / I.A. Bufetov, S.V. Firstov, V.F. Khopin [et al.] // Optics Letters. 2008. Vol. 33. Issue 19. P. 2227-2229.
- 73 High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber lasers / J. Nilsson, W.A. Clarkson, R. Selvas [et al.] // Optical Fiber Technology. 2004. Vol. 10. Issue 1. P. 5-30.
- 74 Optical amplification at 1.3 μm with Bi doped fiber fabricated by VAD method / M. Takahashi, T. Fujii, Y. Saito [et al.] // OptoElectronics and Communications Conference and Photonics in Switching. Optica Publishing Group, 2013. P. TuPS\_9.
- 75 Национальный институт информационных и коммуникационных технологий (National Institute of Information and Communications Technology NICT): офиц. сайт. Токио,. URL: <a href="https://www.nict.go.jp/en/press/2024/01/29-1.html">https://www.nict.go.jp/en/press/2024/01/29-1.html</a> (дата обращения: 27.02.2024)
- 76 Excited-state absorption in various bismuth-doped fibers / K.E. Riumkin, M.A. Melkumov, I.A. Varfolomeev [et al.] // Optics letters. 2014. Vol. 39. Issue 8. P. 2503-2506.
- 77 Norizan, S.F. O-Band Bismuth-Doped Fiber Amplifier With Double-Pass Configuration / S.F. Norizan, W.Y. Chong, S.W. Harun, H. Ahmad // IEEE Photonics Technology Letters. 2011. Vol. 23. Issue 24. C. 1860-1862.

- 78 Bend-insensitive bismuth-doped P 2 O 5-SiO 2 glass core fiber for a compact O-band amplifier / S.V. Firstov, A.M. Khegai, K.E. Riumkin, [et al.] // Optics Letters. 2020. Vol. 45. Issue 9. P. 2576-2579.
- 79 Compact and efficient O-band bismuth-doped phosphosilicate fiber amplifier for fiber-optic communications / S.V. Firstov, A.M. Khegai, A.V. Kharakhordin [et al.] // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. Issue 1. P. 11347.
- 80 Laser diode pumped bismuth-doped optical fiber amplifier for 1430 nm band / M.A. Melkumov, I.A. Bufetov, A.V. Shubin, [et al.] // Optics letters. 2011. Vol. 36. Issue 13. P. 2408-2410.
- 81 40 dB gain all fiber bismuth-doped amplifier operating in the O-band / N.K. Thipparapu, Y. Wang, A.A. Umnikov [et al.] // Optics Letters. 2019. Vol. 44. Issue 9. P. 2248-2251.
- 82 High gain E-band amplification based on the low loss Bi/P co-doped silica fiber / J. Tian, M. Guo, F. Wang [et al.] // Chinese Optics Letters. 2022. Vol. 20. Issue 10. P. 100602.
- 83 Wang, Y. High gain Bi-doped fiber amplifier operating in the E-band with a 3-dB bandwidth of 40nm / Y. Wang, N.K. Thipparapu, D.J. Richardson, J. K. Sahu // Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2021. P. Tu1E. 1.
- 84 Amplified transmission beyond C-and L-bands: Bismuth doped fiber amplifier for O-band transmission / V. Mikhailov, J. Luo, D. Inniss [et al.] // Journal of Lightwave Technology. 2022. Vol. 40. Issue 10. P. 3255-3262.
- 85 Патент №20220052502A1 США. Bismuth doped fiber amplifier: заявл. 13.09.2019, : опубл. 17.02.2022, Luo J., Mikhailov V.: заявитель и патентообладатель OFS Fitel LLC
- 86 400GBASE-LR4 transmission over field-deployed fibre link supported by bismuth-doped fibre amplifier / Y. Wakayama, V. Mikhailov, D.J. Elson [et al.] // 2021 European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2021. P. 1-4.
- 87 Real time 6.4 Tbps ( $8 \times 800G$ ) SHCD transmission through 1+ 8 multicore fiber for co-packaged optical-IO switch applications / T. Gui, H. Du, K. Zheng [et al.] // 2022

- Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2022. C. 1-3.
- 88 301 Tb/s E, S, C+ L-Band Transmission over 212 nm bandwidth with E-band Bismuth-Doped Fiber Amplifier and Gain Equalizer / B.J. Puttnam, R.S. Luís, Y. Huang, [et al.] // European Conference on Optical Communication (ECOC), Glasgow, Scotland. 2023.
- 89 Pump-efficient flattop O+ E-bands bismuth-doped fiber amplifier with 116 nm–3 dB gain bandwidth / Y.J. Ososkov, A.M. Khegai, S.V. Firstov, [et al.] // Optics Express. 2021. Vol. 29. Issue 26. P. 44138-44145.
- 90 Wang, Y. Ultra-broadband bismuth-doped fiber amplifier covering a 115-nm bandwidth in the O and E bands / Y. Wang, N.K. Thipparapu, D.J. Richardson, J.K. Sahu // Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. 39. Issue 3. P. 795-800.
- 91 Maes, F. Gain Behavior of E+ S band Hybrid Bismuth/Erbium-doped Fiber Amplifier Under Different Conditions / F. Maes, M. Sharma, L. Wang, Z. Jiang // European Conference and Exhibition on Optical Communication. Optica Publishing Group, 2022. P. We5. 2.
- 92 Бурков, В. Д. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники: учебное пособие для студентов специальностей / В. Д. Бурков, Г. А. Иванов; Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Московский гос. ун-т леса". Москва: Изд-во Московского гос. ун-та леса, 2007. 222 с.
- 93 Baney, D.M. Theory and measurement techniques for the noise figure of optical amplifiers / D.M. Baney, P. Gallion, R.S. Tucker // Optical fiber technology. 2000. Vol. 6. Issue 2. P. 122-154.
- 94 W-type and Graded-index bismuth-doped fibers for efficient lasers and amplifiers operating in E-band / A.S. Vakhrushev, A.A. Umnikov, A.S. Lobanov [et al.] // Optics Express. 2022. Vol. 30. Issue 2. P. 1490-1498.
- 95 Impact of doping profile on the formation of laser-active centers in bismuth-doped  $GeO_2 SiO_2$  glass fibers / S.V. Alyshev, A.S. Vakhrushev, A.M. Khegai [et al.] // Photonics Research. -2024. Vol. 12. Issue 2 P. 260-270.
- 96 Влияние профиля легирования на формирование лазерно-активных центров в волоконных световодах на основе германосиликатного стекла, легированного

- висмутом / С.В. Алышев, А.С. Вахрушев, А.М. Хегай [и др.] // Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2023). Пермь: 2023. С. 239-240.
- 97 Radial distribution and absorption cross section of active centers in bismuth-doped phosphosilicate fibers / A.M. Khegai, S.V. Firstov, K.E. Riumkin [et al.] // Optics Express. 2020. Vol. 28. Issue 20. P. 29335-29344.
- 98 Effect of GeO2 additive on fluorescence intensity enhancement in bismuth-doped silica glass / Y. Fujimoto, Y. Hirata, Y. Kuwada, [et al.] // Journal of materials research. 2007. Vol. 22. Issue 3. P. 565-568.
- 99 Friebele, E.J. Defect centers in a germanium-doped silica-core optical fiber / E.J. Friebele, D.L. Griscom, Jr G.H. Sigel // Journal of Applied Physics. 1974. Vol. 45. Issue 8. P. 3424-3428.
- 100 Переходные процессы и перекрестные помехи в висмутовом оптическом усилителе для О-диапазона / С.В. Алышев, А.В. Харахордин, А.М. Хегай, Я.Ж. Ососков, А.С. Вахрушев, Е.Г. Фирстова, К.Е. Рюмкин, М.А. Мелькумов, А.С. Лобанов, А.Н. Гурьянов, С.В. Фирстов // Квантовая электроника. − 2021. − Т. 51. − № 7. − С. 630-634.
- 101 Combined effect of thermal and laser treatment on the destruction of active centers in Bi-doped phosphosilicate fibers. / A.V. Kharakhordin, S.V. Alyshev, K.E. Riumkin, A.M. Khegai, A.S. Vakhrushev, E.G. Firstova, M.A. Melkumov, A.S. Lobanov, F.V. Afanasiev, A.N. Guryanov, S.V. Firstov // Optical Materials Express. 2021. Vol. 11. Issue 4. P. 1247-1258.
- 102 Efficient approach for gain spectrum management of Bi-doped fibers / A.M. Khegai, A.S. Lobanov, Y.Z. Ososkov, A.S. Vakhrushev, K.E. Riumkin, A.V. Kharakhordin, S.V. Alyshev, E.G. Firstova, A.N. Guryanov, M.A. Melkumov, S.V. Firstov // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, 20-24 June 2022, Russia, Saint Petersburg, doi: 10.1109/ICLO54117.2022.9840164.
- 103 Recent advances in Bi-doped silica-based optical fibers: A short review. / A.M. Khegai, S.V. Alyshev, A.S. Vakhrushev [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids: X. 2022. P. 100126.

- 104 Висмутовый волоконный лазер с накачкой в оболочку световода, излучающий в области длин волн 1.3 1.4 мкм / А.С. Вахрушев, А.В. Харахордин, А.М. Хегай, [и др.] // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. №. 8. С. 681-684.
- 105 Deterioration of Bismuth-Doped fiber lasers performance induced by blue and green laser light launched into cladding. / S.V. Firstov, A.V. Kharakhordin, A.S. Vakhrushev [et al.] // Results in Physics. 2022. Vol. 34. P. 105276.
- 106 Poumellec, B. Links between writing and erasure (or stability) of Bragg gratings in disordered media / B. Poumellec // Journal of non-crystalline solids. 1998. Vol. 239. Issue 1-3. P. 108-115.
- 107 Erdogan, T. Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings / T. Erdogan, V. Mizrahi, P. J. Lemaire, D. Monroe // Journal of applied physics. 1994. Vol. 76. Issue 1. P. 73-80.
- 108 Multiphoton-absorption-excited up-conversion luminescence in optical fibers / F. Mangini, M. Ferraro, M. Zitelli [et al.] // Physical Review Applied. 2020. Vol. 14. Issue 5. P. 054063.
- 109 Pacchioni, G. Electronic structure of defect centers P1, P2, and P4 in P-doped SiO2 / G. Pacchioni, D. Erbetta, D. Ricci, M. Fanciulli // The Journal of Physical Chemistry B. 2001. Vol. 105. Issue 26. P. 6097-6102.
- 110 Griscom, D.L. Fundamental defect centers in glass: Electron spin resonance and optical absorption studies of irradiated phosphorus-doped silica glass and optical fibers / D.L. Griscom, E.J. Friebele, K.J. Long, J.W. Fleming // Journal of Applied Physics. 1983. Vol. 54. Issue 7. P. 3743-3762.
- 111 Photoinduced absorption and refractive-index induction in phosphosilicate fibres by radiation at 193 nm / A.A. Rybaltovsky, V.O. Sokolov, V.G. Plotnichenko [et al.] // Quantum Electronics. -2007. Vol. 37. Issue 4. P. 388.
- 112 Photo-induced bleaching and thermally stimulated recovery of BAC-P in Bi-doped phosphosilicate fibers / Q. Zhao, Q. Hao, Y. Luo [et al.] // Optics Letters. 2020. Vol. 45. Issue 19. P. 5389-5392.

- 113 UV irradiation-induced structural transformation in phosphosilicate glass / E.M. Dianov, V.V. Koltashev, V.G. Plotnichenko [et al.] // Journal of non-crystalline Solids. 1999. Vol. 249. Issue 1. P. 29-40.
- 114 Linkage of oxygen deficiency defects and rare earth concentrations in silica glass optical fiber probed by ultraviolet absorption and laser excitation spectroscopy / Y.S. Liu, T.C. Galvin, T. Hawkins [et al.] // Optics express. 2012. Vol. 20. Issue 13. P. 14494-14507.
- 115 Photoexcitation of Yb-doped aluminosilicate fibers at 250 nm: evidence for excitation transfer from oxygen deficiency centers to Yb 3+ / C.G. Carlson, K.E. Keister, P.D. Dragic [et al.] // JOSA B. 2010. Vol. 27. Issue 10. P. 2087-2094.
- 116 Photobleaching effect in bismuth-doped germanosilicate fibers / S.V. Firstov, S.V. Alyshev, V.F. Khopin // Optics express. 2015. Vol. 23. Issue 15. P. 19226-19233. 117 Dependence of the photobleaching on laser radiation wavelength in bismuth-doped germanosilicate fibers / S.V. Firstov, S.V. Alyshev, E.G. Firstova [et al.] // Journal of Luminescence. 2017. Vol. 182. P. 87-90.
- 118 Desurvire, E. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications / E. Desurvire, M.N. Zervas // Physics Today. 1995. Vol. 48 Issue 2. P. 56–58.
- 119 Experimental characterization of Bismuth-Doped fibre amplifier: electrical NF, PDG, and XGM / N. Taengnoi, K.R. Bottrill, Y. Hong [et al.] // CLEO: Science and Innovations. Optica Publishing Group, 2020. P. SW3R. 2.
- 120 Cladding-pumped bismuth-doped fiber laser / S.V. Firstov, A.A. Umnikov, A.V. Kharakhordin, A.S. Vakhrushev, E.G. Firstova, S.V. Alyshev, A.M. Khegai, K.E. Riumkin, Y.Z. Ososkov, A.N. Guryanov, M.A. Melkumov // Optics Letters. 2022. Vol. 47. Issue 4. P. 778-781.
- 121 Cladding-pumped bismuth-doped fiber laser with brightness enhancement / A.S. Vakhrushev, A.V. Kharakhordin, Y.Z. Ososkov [et al.] // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO-2022). Saint Petersburg: 2022. doi: 10.1109/ICLO54117.2022.9840137.

- 122 Double-Clad Bismuth-Doped Fiber with a Rectangular Inner Cladding for Laser Application / A.S. Vakhrushev, A.A. Umnikov, S.V. Alyshev [et al.] // Photonics. 2022. Vol. 9. Issue 11. P. 788.
- 123 Output power saturation effect in cladding-pumped bismuth-doped fiber lasers / A.S. Vakhrushev, Y.Z. Ososkov, S.V. Alyshev [et al.] // Journal of Lightwave Technology. 2022. Vol. 41. Issue 2. P. 709-715.
- 124 Cladding pumped bismuth-doped fiber amplifiers operating in O-, E-, and S-telecom bands / A.S. Vakhrushev, A.M. Khegai, S.V. Alyshev [et al.] // Optics Letters. 2023. Vol. 48. Issue 6. P. 1339-1342.
- 125 Широкополосный висмутовый волоконный усилитель для O+E+S-телекоммуникационного диапазона с многомодовой накачкой / А.С. Вахрушев, К.Е. Рюмкин, А.М. Хегай [и др.] // Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2023). Пермь: 2023. С. 241-242.
- 126 Непрерывные висмутовые волоконные лазеры с многомодовой диодной накачкой / А.С. Вахрушев, С.В. Алышев, А.М. Хегай [и др.] // Автометрия. -2023. Т. 59. № 1. С. 5-14.
- 127 Вахрушев А.С. Висмутовые волоконные лазеры с накачкой по оболочке, излучающие в области длин волн 1.4–1.5 мкм / Вахрушев А.С. // Школаконференция молодых учёных «Прохоровские недели». Тезисы докладов. М.: 2022. С. 7-10.
- 128 A device for measuring the angular distribution of the output radiation of optical fibers / M.V. Grekov, S.A. Vasil'ev, I.G. Korolev [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. 2005. Vol. 48. P. 96-101.
- 129 Quimby, R.S. High quantum efficiency of near-infrared emission in bismuth doped AlGeP-silica fiber / R.S. Quimby, R.L. Shubochkin, T.F. Morse // Optics Letters. 2009. Vol. 34. Issue 20. P. 3181-3183.
- 130 Amplified spontaneous emission in cladding-pumped L-band erbium-doped fiber amplifiers / M. Soderlund, S. Tammela, P. Poyhonen [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. 2001. Vol. 13. Issue 1. P. 22-24.