

Харахордин Александр Васильевич

**ФОТО- И ТЕРМОИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ
В СВЕТОВОДАХ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ $\text{GeO}_2\text{--SiO}_2$ СТЕКЛА,
ЛЕГИРОВАННОГО ВИСМУТОМ**

1.3.19. Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискания ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Фирстов Сергей Владимирович доктор физико-математических наук, заместитель руководителя по научной работе Научного центра волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН (обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»)

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Бутов Олег Владиславович доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории волоконно-оптических технологий, заместитель директора по научной работе, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук»

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

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (ИТМО)

Защита состоится «__» _____ 2022 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.223.02 в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН <https://diss.gpi.ru/all/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук



Т. Б. Воляк

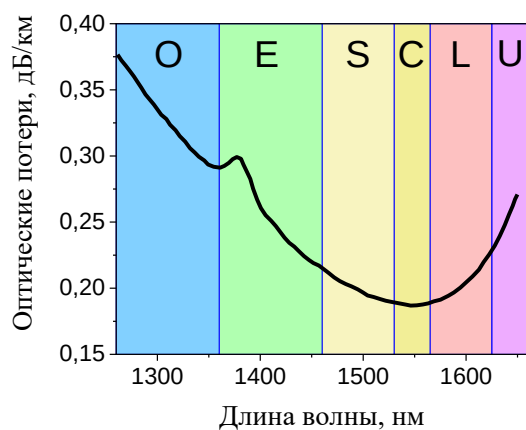
тел. +7(499) 503-8777 доб. 1-47

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

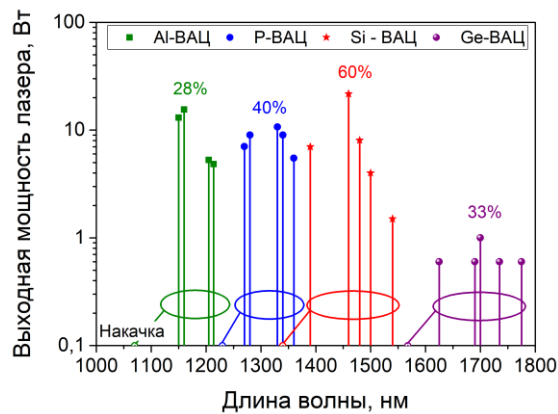
Актуальность темы исследования

Волоконно-оптические системы связи существенно преобразили окружающий нас мир, поскольку с их помощью можно передавать существенные объемы информации на большие расстояния с высокой скоростью (~ 100 Гбит/с). Благодаря этому такие системы получили широкое распространение по всему миру как надежный способ обмена информацией. Существенное развитие таких систем связи произошло после создания оптических световодов с низким потерями $< 0,2$ дБ/км (на данный момент достигнут уровень $0,142$ дБ/км на длине волны 1550 нм [1]) в ближнем ИК-диапазоне. Это привело к тому, что спектральный диапазон пропускания волоконных световодов на основе кварцевого стекла, который может использоваться в телекоммуникационных целях, стал достаточно широк: от $\sim 1,3$ до $1,7$ мкм (Рис. 1(a)).

Следует отметить, что, несмотря на низкий уровень затухания телекоммуникационных световодов, в системах оптической связи важное значение играют волоконно-оптические усилители – компенсаторы потерь оптической мощности передаваемого сигнала. Основным элементом таких усилителей является активная среда, представляющая собой световод с сердцевинной, содержащей активную добавку; как правило, это редкоземельные элементы. В зависимости от рабочей спектральной области в качестве активных ионов могут использоваться Er для $1,5$ – $1,6$ мкм; Yb для 1 – $1,1$ мкм; Tm, Ho для $1,8$ – 2 мкм. При всех своих преимуществах (эффективности, высокому квантовому выходу и др.) такие усиливающие среды имеют один общий недостаток – узкая полоса усиления, которая не позволяет полностью использовать весь потенциал волоконно-оптических систем связи. Наличие спектральных областей, недоступных для световодов с редкоземельными ионами, и практический интерес к ним стимулировали проведение поисковых исследований новых эффективных активаторов с оптическими переходами в областях длин волн $1,2$ – $1,5$ мкм и $1,6$ – $1,8$ мкм.



(а)



(б)

Рис. 1. (а) Телекоммуникационные диапазоны, их обозначение и спектр оптических потерь световодов на основе кварцевого стекла; (б) Максимально достигнутые значения эффективности и выходной мощности лазеров на основе висмутовых световодов в зависимости от типа активного центра.

Начиная с 2005 года, основное внимание в отношении освоения указанных областей было приковано к висмутовым световодам, обладающим ИК-люминесценцией. К настоящему времени показано, что использование стеклянных волокон, легированных висмутом, позволяет успешно разработать эффективные усилители и лазеры в вышеуказанных диапазонах длин волн [2]. Это стало возможным из-за уникальных особенностей таких сред, к которым в первую очередь следует отнести смещение полос люминесценции и усиления, вызванное изменением химического состава стекла сердцевины световода. К примеру, висмутовые волоконные световоды с сердцевиной из алюмосиликатного, фосфоросиликатного и германосиликатного стекол способны усиливать оптическое излучение в различных областях длин волн ближнего ИК-диапазона: в окрестности 1,15, 1,33 и 1,43 мкм соответственно. Получение оптического усиления в более длинноволновой области (>1600 нм) также возможно, но только при использовании легированных висмутом германосиликатных волокон с высоким содержанием $\text{GeO}_2 \geq 50$ мол.%. Максимально достигнутые

показатели висмутовых лазеров в зависимости от типа активного центра, на переходах которого была получена генерация, представлены на Рис. 1(б).

В настоящее время в данном направлении сформировалось несколько научных проблем, касающихся оптимизации параметров лазеров, достижения новых режимов генерации, освоения новых спектральных областей, временной стабильности устройств и т.д. После первого обнаружения явления фотодеградации свойств висмутовых световодов особую актуальность приобрела проблема устойчивости висмутовых активных центров (ВАЦ) при облучении лазерным излучением [3]. Данное явление проявляется в виде снижения интенсивности полос поглощения и люминесценции, относящихся к ВАЦ, ассоциированных с германием [4, 5]. Кроме того, была показана возможность термически активированного восстановления фотообесцвеченных ВАЦ такого типа [4].

Следует отметить, что описанные явления имеют важную научную значимость, которая может быть сформулирована как изучение фундаментальных механизмов формирования активных центров в стеклянной матрице, а также протекающих в них процессов. Получение таких данных могут позволить решить фундаментальные задачи теории стекла и подобных разупорядоченных структур, лучше понять строение и структуру дефектов и их взаимосвязи с ВАЦ. Все вышеперечисленное определяет актуальность выбранной тематики исследования.

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы являлось исследование фото- и термоиндуцированных явлений (фотообесцвечивание, термически активированное восстановление и формирование ВАЦ) в волоконных световодах с сердцевиной из германосиликатного стекла, легированного висмутом; определение фундаментальных параметров, характеризующих изучаемые процессы; их влияние на генерационные и усилительные характеристики световодов; построение моделей процессов и проведение

численных расчетов; теоретическая оценка долговременной стабильности выходных характеристик висмутовых лазеров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

- 1) Изучение закономерностей процессов разрушения висмутовых активных центров при воздействии лазерного излучения. Изучение возможности использования полос видимой (антистоксовой) люминесценции для наблюдения/регистрации исследуемого процесса.
- 2) Проведение систематического изучения влияния различных параметров отжига (скорость, длительность, температура нагрева и условия охлаждения) высокогерманатных световодов, легированных висмутом, на интенсивность термоиндуцированных процессов, приводящих к формированию центров люминесценции. Экспериментальное исследование влияния режимов отжига на генерационные свойства исследуемых световодов. Выполнение численных расчетов по оптимизации выходных характеристик лазеров.
- 3) Проведение исследований, направленных на определение основных характерных параметров (скорость реакции, энергия активации и др.) физикохимических реакций формирования висмутовых активных центров.
- 4) Поисковые исследования, ориентированные на изучение влияния условий процесса вытяжки световодов на оптические и лазерные свойства висмутовых германосиликатных световодов с полосой усиления в области длин волн 1600–1800 нм. В частности, изучение влияния параметров (скорость, температура, натяжение) процесса вытяжки на генерационные свойства висмутовых волоконных световодов с высоким содержанием германия в сердцевине.
- 5) Выполнение исследований по определению процессов деградации свойств висмутовых световодов (вследствие разрушения активных центров) при одновременной тепловой обработке и воздействии ИК-излучения. Установление основных закономерностей и механизмов, ответственных за изучаемый процесс. Построение феноменологической модели исследуемого

процесса. Проведение сравнительного анализа результатов расчетов с экспериментальными данными. Теоретическое изучение долговременной стабильности работы лазеров на основе висмутовых волоконных световодов.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) Лазерное излучение на длине волны около 1550 нм разрушает активные центры с полосой усиления в области длин волн 1,6–1,8 мкм, формирующиеся в $\text{GeO}_2\text{--SiO}_2$ стеклянных световодах с висмутом, нагретых до температур выше 300°C.
- 2) Повышение скорости вытяжки с 10 м/мин до 50–100 м/мин при температуре $T = 1850^\circ\text{C}$ легированных висмутом германосиликатных световодов с высоким содержанием оксида германия (более 40 мол.%) приводит к увеличению дифференциальной эффективности лазеров, генерирующих в области 1,6–1,8 мкм, с 17 до 34%.
- 3) Процессы, приводящие к формированию висмутовых активных центров, ассоциированных с германием, характеризуются энергией активации 0,4–1,14 эВ, обусловленной различной физической природой прекурсоров.
- 4) Воздействие излучения ИК-диапазона с длиной волны $\lambda > 1,4$ мкм не приводит к процессу деградации висмутовых активных центров и не оказывает существенного влияния на выходные характеристики лазеров на висмутовых световодах, работающих в непрерывном режиме более 5000 ч при температуре ниже 100°C.

Научная новизна и практическая значимость работы

➤ Впервые обнаружено новое оптическое явление – фотообесцвечивание ВАЦ, ассоциированных с германием, в процессе термообработки световодов, облученных лазерным излучением около 1550 нм. Установлены закономерности протекания данного процесса, построена феноменологическая модель, которая описывает экспериментальные данные.

Определены характерные параметры процесса (энергия активации, скорость реакции). Данная модель позволила оценить влияние фотообесцвечивания центров при долговременной работе висмутовых лазеров при различных температурных режимах.

➤ Проведено систематическое изучение влияния различных параметров термообработки (скорость, длительность, температура нагрева и условия охлаждения) высокогерманатных световодов, легированных висмутом, на интенсивность термоиндуцированных процессов, приводящих к формированию центров ИК люминесценции. В результате были получены экспериментальные данные о факторах, оказывающих наибольшее влияние на оптические свойства висмутовых световодов. Показана возможность применения концепции демаркационной энергии для анализа термоиндуцированных процессов формирования ВАЦ.

➤ Впервые обнаружено и исследовано влияние скорости вытяжки на оптические и лазерные свойства висмутовых германосиликатных световодов с полосой усиления в области длин волн 1600–1800 нм. Оптимизация параметров процесса вытяжки позволила реализовать световоды с улучшенными характеристиками. Использование таких световодов привело к увеличению эффективности лазерной генерации на длине волны около 1,7 мкм с 17 до 34%.

Полученные результаты могут быть использованы для уточнения структурных особенностей и механизмов формирования висмутовых активных центров (ВАЦ) в исследованных стеклах, усовершенствования технологии получения висмутовых световодов, а также для оценки эксплуатационных возможностей висмутовых лазеров.

Личный вклад диссертанта

Основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии.

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 научного оборудования.

Апробация работы

Результаты исследований неоднократно были изложены в виде устных докладов на семинарах НЦВО РАН. Материалы диссертации также докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: XXV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2018» Москва, 2018; Всероссийская конференция по волоконной оптике, Пермь, октябрь 2017; 17-я Международная научная конференция-школа: «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» Саранск, 2018 г.; 18th International Conference on Laser Optics (ICLO), июнь 2018, Санкт-Петербург; International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT), September 2018, Tarragona, Spain; Юбилейная международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике, посвященная 50-летию первой школы по люминесценции в Иркутске, Иркутск, июль 2019 г.; 19th International Conference on Laser Optics (ICLO), St. Peterburg, November 2020; 20th International Conference on Defects in Insulating Materials (ICDIM), November 2020, Brazil; Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2021). Shanghai, China, 24-27 October, 2021.

Публикации

Основные результаты опубликованы в 7 статьях в журналах из перечня ВАК РФ и 8 сборниках трудов всероссийских и международных

конференций. Список статей по теме диссертации приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 139 страниц машинописного текста, содержит 82 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 128 наименований. В конце каждой главы представлены основные результаты, полученные в ней.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертации, описаны научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора.

В **первой главе** представлен обзор опубликованных работ по теме диссертации, касающихся оптических свойств кристаллических и стеклообразных материалов, легированных висмутом, предложенных моделей ВАЦ, а также основных выходных характеристик устройств на основе таких активных сред. Представлены основные этапы развития данного направления, приведенные в хронологическом порядке. Также приводится описание явлений фотообесцвечивания активных центров, их термоиндуцированного восстановления в висмутовых волоконных световодах и световодах, легированных редкоземельными ионами. Сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию процесса изготовления висмутовых световодов, основных параметров исследуемых образцов. Также приведены экспериментальные установки и изложены основные методы исследования, примененные в ходе выполнения работы.

В **третьей главе** представлены экспериментальные результаты по изучению эффекта фотообесцвечивания активных центров в

германосиликатных световодах с висмутом, а также процесса их самопроизвольного восстановления. Установлено, что на начальном участке данный процесс характеризуется различными временами: <4 мкс и ~ 200 мкс, что, по-видимому, может объясняться наличием разнообразных подтипов конкретного типа ВАЦ. Показана возможность инициирования процесса фотообесцвечивания ВАЦ при помощи ввода излучения в оболочку световода с отражающим покрытием. Данный способ обработки позволяет осуществлять равномерное воздействие лазерным излучением видимого диапазона на отрезки активных световодов длиной ~ 100 м и сокращение времени воздействия для достижения полного обесцвечивания ВАЦ, чем при вводе излучения непосредственно в сердцевину световода (при аналогичных длинах). Восстановление утерянных после лазерного облучения свойств висмутовых световодов возможно только после тепловой обработки $300\text{--}400^\circ\text{C}$. Показано, что детектирование стирания ВАЦ можно осуществлять по интенсивности полос антистоксовой люминесценции вблизи 485 нм, механизм возникновения которой также подробно изучался.

Четвертая глава была посвящена подробному исследованию влияния параметров тепловой обработки (времени и температуры отжига, скорости нагрева и охлаждения) на оптические (люминесцентные, абсорбционные, усилительные и лазерные) свойства висмутовых световодов с сердцевиной из высокогерманатного стекла. Основное внимание было уделено следующим процессам в таких световодах:

- 1) Термически индуцированное формирование дополнительного количества ВАЦ, а также неактивных форм висмута, ответственных за появление ненасыщаемого поглощения.
- 2) Термически активированное восстановление обесцвеченных лазерным излучением ВАЦ.

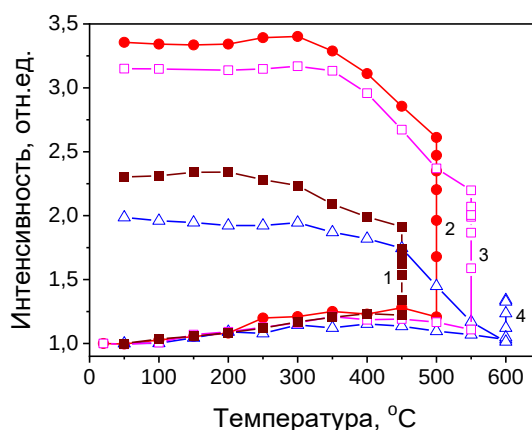


Рис. 2. Зависимости нормированной интенсивности люминесценции на длине волны 1,7 мкм от температуры: нагрев; отжиг в течение 1 часа при соответствующей температуре (1 – 450 °C, 2 – 500 °C, 3 – 550 °C, 4 – 600 °C); охлаждение.

Из результатов исследования по изотермическому отжигу висмутовых световодов была определена оптимальная температура (около $500 \pm 25^\circ\text{C}$), при которой в таких световодах происходит наибольший прирост количества ВАЦ. На Рис. 2 показаны зависимости изменения (по отношению к интенсивности люминесценции исходного световода) интенсивности люминесценции на длине волны 1700 нм исследуемых световодов в процессе изохронного процесса термообработки. Видно, что максимально достигнутый прирост интенсивности люминесценции, а следовательно, количества ВАЦ, составил $\sim 3,5$ раза.

Для изучения механизмов формирования ВАЦ и неактивных форм висмута, ответственных на ненасыщаемые потери, была применена концепция демаркационной энергии [6]. Данный подход позволяет оценить скорость и энергию активации протекающих реакций. Для этого были экспериментально измерены временных зависимостей изменения количества ВАЦ и неактивных форм висмута при различных температурах.

Для анализа экспериментальных данных были сделаны следующие предположения:

- 1) В сетке стекла существуют структурные элементы, включающие ион висмута, – прекурсоры ВАЦ, которые в результате тепловой обработки могут быть преобразованы в ВАЦ.
- 2) Процесс преобразования прекурсоров в ВАЦ описывается химической реакцией первого порядка, а скорость процесса зависит от температуры согласно уравнению Аррениуса.
- 3) Существует распределение $g(E)$ по энергии активации прекурсоров ВАЦ из неоднородностей сетки стекла. В данном случае использовалось гауссово распределение.

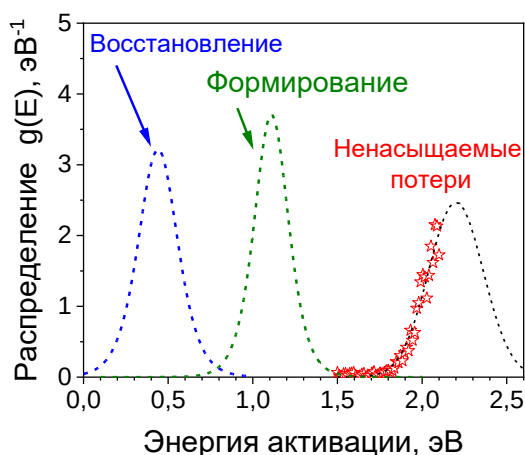


Рис. 3. Экспериментально полученные распределения энергии активации $g(E)$ формирования и восстановления ВАЦ и неактивных форм висмута.

На основании сделанных предположений, а также того, что демаркационная энергия, которая разграничивает области энергии для уже прореагировавших прекурсоров и тех, которые еще не вступали в реакцию, может быть выражена по формуле: $E_d = k_B T \ln(k_0 t)$, где T – температура, t – время, k_0 – константа скорости, k_B – постоянная Больцмана; были получены характерные распределения энергии активации физико-химических реакций формирования ВАЦ (Рис. 3). Характерная энергия активации и константа скорости реакции формирования ВАЦ, неактивных форм висмута оказались равными 1,14 эВ и 10^4 с^{-1} , более 2,2 эВ и $\sim 10^8 \text{ с}^{-1}$ соответственно. Установлено, что процесс восстановления фотообесцвеченных ВАЦ

происходит при заметно меньших энергиях. Характерная энергия активации и константа скорости в таком случае составляет около 0,44 эВ и $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$ соответственно (Рис. 3). Различие энергий активации ВАЦ обусловлено различной физической природой прекурсоров ВАЦ. Полученные энергии активации формирования ВАЦ соответствуют процессам диффузии кислородных вакансий в высокогерманатных стеклах.

Генерационные свойства термически обработанных световодов исследовались путем создания лазеров с линейным резонатором, состоящим из активной среды и двух зеркал (глухое – высокоотражающая волоконная брэгговская решетка на 1,7 мкм; выходное – сколотый торец активного световода).

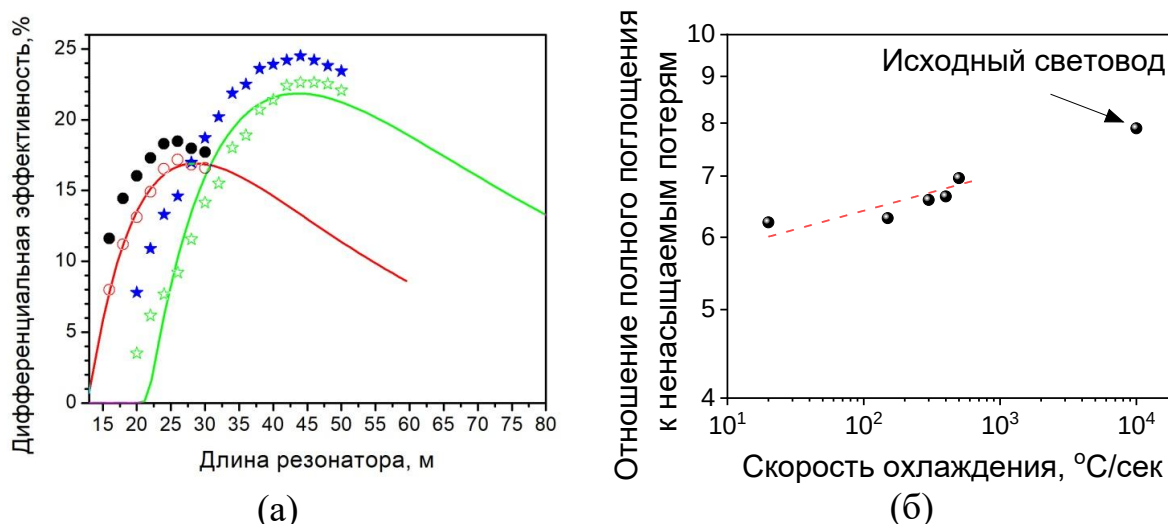


Рис. 4. (а) Зависимости дифференциальной эффективности лазеров на основе исходного (звездочки) и термически обработанного (кружки) световода. Закрашенные/незакрашенные – для поглощенной/введенной мощности накачки. Линиями показаны результаты расчета; (б) зависимость отношения полного поглощения к ненасыщаемым потерям от скорости охлаждения световодов после тепловой обработки.

На Рис. 4 (а) показаны зависимости дифференциальной эффективности висмутовых лазеров на основе световодов до и после термообработки от длины резонатора, определяемого преимущественно

длиной активной среды. Видно, что эффективность лазеров на световодах после термообработки заметно выше ~17–18% по сравнению с лазером на исходном световоде (7–8%) для длины резонатора 22 м. Однако такие световоды все же уступают световодам без термообработки в максимально достижимой эффективности, что объясняется ростом ненасыщаемых оптических потерь, которые, как выяснилось, зависят от условий остывания световодов. В частности, с возрастанием скорости охлаждения нагретого висмутового световода происходит снижение ненасыщаемых потерь, что приводит к увеличению отношения полного поглощения к ненасыщаемым потерям, что показано на Рис. 4(б). На этом основании было сделано предположение, что параметры вытяжки (скорость и температура) могут влиять на параметры получаемых световодов.

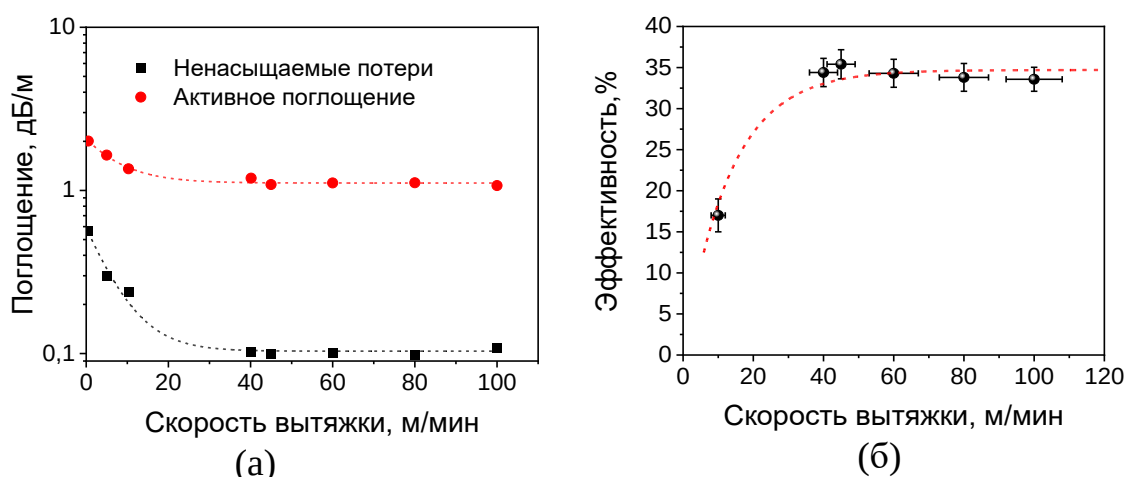


Рис. 5. (а) Зависимость величины поглощения ВАЦ и ненасыщаемых потерь от скорости вытяжки. б) Дифференциальная эффективность лазеров на основе легированных висмутом световодов с высоким содержанием оксида германия (более 40 мол.%), полученных с различными скоростями вытяжки. Температура вытяжки составляла 1850°C.

Результаты исследований по влиянию скорости вытяжки на абсорбционные свойства висмутовых световодов и эффективность лазеров на их основе представлены на Рис. 5. Видно, что при возрастании скорости вытяжки световодов с 0,5 до 50–100 м/мин происходит существенное

снижение (~ 5 раз) величины ненасыщаемых потерь, тогда как активного поглощение уменьшалось лишь вдвое.

Как видно на Рис. 5, это положительно сказывалось на эффективности лазеров, создаваемых на основе таких световодов. Оптимизация параметров вытяжки, в частности повышение скорости вытяжки с 10 м/мин до 40-100 м/мин, позволила добиться увеличения эффективности лазеров, генерирующих в области 1,6–1,8 мкм, с 17 до 34%.

В пятой главе изучен эффект обесцвечивания ВАЦ в нагретых световодах при воздействии излучения ИК-диапазона. Как оказалось, что помимо термически индуцированного формирования ВАЦ, описанного ранее, в висмутовых световодах происходит процесс разрушения ВАЦ, которое проявляется в виде снижения интенсивности полос люминесценции и поглощения ВАЦ в процессе облучения излучением накачки около 1550 нм. На Рис. 6(а) показана зависимость изменения интенсивности люминесценции около 1,7 мкм висмутового германосиликатного световода нагретого до 500°C. На первом этапе (0–50 мин) накачка на 1550 нм с мощностью 150 мВт включалась для измерения интенсивности люминесценции на короткие временные интервалы (~ 10 с) с большим временем простоя ($\sim 2,5$ мин), на втором этапе (50–150 мин) накачка подавалась непрерывно на всем временном промежутке наблюдения. Видно, что в первом случае происходит возрастание интенсивности люминесценции, а во втором ее монотонное снижение. Такое поведение объясняется конкуренцией двух процессов (фотообесцвечивания и термоиндуцированного формирования ВАЦ), один из которых становится доминирующим.

Обнаруженный эффект, проявляющийся в деградации свойств висмутовых световодов, имеет важное практическое значение, заключающееся в том, что он может оказывать влияние на стабильную работу оптических устройств на основе таких световодов. Установлено, что скорость изучаемого процесса возрастает с повышением температуры

активного световода. В этом отношении особый интерес представляет определение интенсивности такого процесса для относительно низких температур (30–100°C), типичных для эксплуатации волоконных лазеров. Прямые исследования, проведенные при комнатной температуре, показали, что данный эффект в висмутовых световодах находится в пределах погрешности измерений для времени наблюдения несколько десятков часов. Эти результаты не дают прямого ответа на вопрос о влиянии эффекта фотообесцвечивания ВАЦ на стабильность работы устройств при их длительной непрерывной эксплуатации. Для получения большей информации об этом была построена модель процесса, включающая оптические процессы возбуждения ВАЦ, а также обратимые физико-химические процессы, описываемые уравнениями реакции первого порядка с различными константами скорости и энергиями активации. Предложенная модель хорошо описывала экспериментальные данные по деградации ВАЦ в температурном диапазоне 400–600°C.

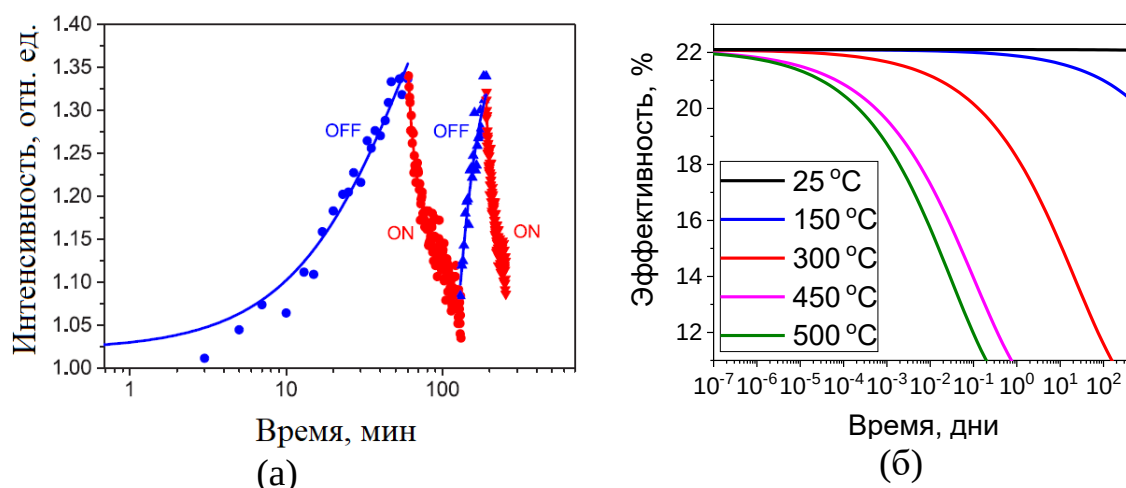


Рис. 6. (а) Временная эволюция люминесценции висмутового световода, находящегося при температуре 500°C, при последовательном включении и выключении непрерывного излучения 1550 нм; б) расчетные значения изменения эффективности лазера в процессе работы при различных температурах активной среды.

На следующем этапе данная модель применялась для экстраполяционного прогнозирования деградации свойств висмутовых световодов при температурах 30–400°C. Полученные результаты были использованы при моделировании долговременной работы висмутовых лазеров для различных температур активной среды. В итоге были получены временные зависимости изменения эффективности висмутового лазера в процессе работы с учетом возможных процессов фотообесцвечивания ВАЦ (см. Рис. 6(б)). Установлено, что при температурах выше 300°C происходит заметное снижение эффективности лазеров после 10-дневной работы. Однако важно отметить, что влияние данного процесса на эффективность лазеров становится пренебрежимо малым при температурах ниже 100°C в промежутке времени не менее 5000 часов.

В заключении работы сформулированы основные выводы по результатам проведенных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Проведены комплексные исследования влияния различных параметров (скорость, длительность, температура нагрева и условия охлаждения) термообработки световодов с сердцевиной из $\text{GeO}_2\text{--SiO}_2$ стекла, легированного висмутом, на интенсивность процессов, ответственных за формирование и разрушение висмутовых активных центров (ВАЦ). Установлено, что выбор оптимальных условий термообработки позволяет увеличить в 3,5 раза концентрацию ВАЦ с полосой оптического усиления в области длин волн 1,65–1,73 мкм. Экспериментально показано, что тепловая обработка инициирует процесс образования неактивных форм висмута, являющихся источниками дополнительных (ненасыщаемых) оптических потерь в исследованных висмутовых световодах.

2) Получены зависимости временной эволюции интенсивности люминесценции ВАЦ в висмутовых световодах (до и после воздействия

лазерного обесцвечивающего ВАЦ излучения) в процессе температурной обработки при 300–600°C. Применение концепции демаркационной энергии позволило определить энергию активации формирования ВАЦ, равную 1,14 эВ, и функцию ее распределения, ширина которой составляет $\Delta E = 0,25$ эВ. Установлено, что энергия активации восстановления фотообесцвеченных ВАЦ составляет 0,4 эВ.

3) Впервые экспериментально исследовано влияние скорости вытяжки легированных висмутом германосиликатных световодов на их оптические и лазерные свойства. Установлено, что повышение скорости вытяжки до 50–100 м/мин приводит к улучшению вдвое (по сравнению со скоростью 10 м/мин) отношения поглощения ВАЦ к оптическим (ненасыщаемым) потерям, связанным преимущественно с неактивными формами висмута. Продemonстрировано, что применение таких световодов позволяет поднять эффективность лазеров с 17% (для скорости 10 м/мин) до 34% (для скорости вытяжки >50 м/мин). Вытяжка световодов такого типа со скоростями ниже 1 м/мин сопровождается повышением уровня не связанных с ВАЦ оптических потерь, ухудшающих их лазерные свойства.

4) Впервые обнаружено явление разрушения ВАЦ с полосой люминесценции около 1700 нм, вызванное воздействием лазерного излучения на длине волны 1550 нм. Установлено, что скорость изучаемого процесса возрастает с повышением температуры активного световода. Предложена и разработана модель процесса фотообесцвечивания ВАЦ, включающая оптические процессы, а также обратимые физико-химические процессы, описываемые уравнениями реакции первого порядка с различными константами скорости и энергиями активации. Применение данной модели позволило установить, что процесс фотообесцвечивания ВАЦ не оказывает заметного влияния на выходные параметры лазеров при температурах ниже 100°C при 5000 ч непрерывной работы.

СПИСОК СТАТЕЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. **Kharakhordin A.V.**, Alyshev S.V., Firstova E.G., Khegai A.M., Melkumov M.A., Khopin V.F., Lobanov A.S., Guryanov A.N., Firstov S.V. Analysis of thermally activated processes in bismuth-doped $\text{GeO}_2\text{--SiO}_2$ glass fibers using the demarcation energy concept // *Optical Materials Express*. – 2019. – Vol. 9. – Issue 11. – P. 4239-4246.
- A2. Alyshev S.V., **Kharakhordin A.V.**, Firstova E.G., Khegai A.M., Melkumov M.A., Khopin V.F., Lobanov A.S., Guryanov A.N., Firstov S.V. Photostability of laser-active centers in bismuth-doped $\text{GeO}_2\text{--SiO}_2$ glass fibers under pumping at 1550 nm // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27. – Issue 22. – P. 31542-31552.
- A3. Фирстов С.В., Фирстова Е.Г., **Харахордин А.В.**, Рюмкин К.Е., Алышев С.В., Мелькумов М.А., Дианов Е.М. Антистоксова люминесценция в световодах с сердцевинной из высокогерманатного стекла, легированного висмутом // *Квантовая электроника*. – 2019. – Т. 49. – №3. – С. 237–240ю
- A4. Firstov S.V., Alyshev S.V., Khopin V. F., **Kharakhordin A.V.**, Lobanov A.S., Firstova E.G., Riumkin K.E., Khegai A.M., Melkumov M.A., Guryanov A. N., Dianov E. M. Effect of heat treatment parameters on the optical properties of bismuth-doped $\text{GeO}_2\text{:SiO}_2$ glass fibers // *Optical Materials Express*. – 2019. – Vol. 9. – Issue 5. – P. 2165-2174.
- A5. Firstov S.V., Levchenko A.E., **Kharakhordin A.V.**, Khegai A.M., Alyshev S.V., Melkumov M.A., Khopin V.F., Lobanov A.S., Guryanov A.N. Effect of drawing conditions on optical properties of bismuth-doped high- $\text{GeO}_2\text{--SiO}_2$ fibers // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2020. – Vol. 32. – Issue 15. – P. 913–916.
- A6. **Kharakhordin A.V.**, Alyshev S.V., Firstova E.G., Lobanov A.S., Khopin V.F., Khegai A.M., Melkumov M.A., Guryanov A.N., Firstov S.V. Lasing properties of thermally treated $\text{GeO}_2\text{--SiO}_2$ glass fibers doped with bismuth // *Applied Physics B*. – 2020. – Vol. 126. – P. 87.
- A7. Alyshev S.V., **Kharakhordin A.V.**, Khegai A.M., Riumkin K.E., Firstova E.G., Melkumov M.A., Khopin V.F., Lobanov A.S., Guryanov A.N., Firstov S.V.

Thermal stability of bismuth-doped high-GeO₂ fiber lasers // *Proc. SPIE* 11357, Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications II. – 2020. – 113570P.

ЛИТЕРАТУРА

-
1. Tamura Y., Sakuma H., Morita K., Suzuki M., Yamamoto Y., Shimada K., Honma Y., Sohma K., Fujii T., Hasegawa T. The First 0.14-dB/km Loss Optical Fiber and its Impact on Submarine Transmission // *J. Light. Technol.* – 2018. – Vol. 36. – Issue 1. – P. 44–49.
 2. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S. V., Riumkin K.E., Shubin A. V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. Bi-Doped Optical Fibers and Fiber Lasers // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2014. – Vol. 20. – Issue 5. – P. 0903815.
 3. Firstov S. V., Alyshev S. V., Melkumov M.A., Riumkin K.E., Shubin A. V., Dianov E.M. Bismuth-doped optical fibers and fiber lasers for a spectral region of 1600–1800 nm // *Opt. Lett.* – 2014. – Vol. 39. – Issue 24. – P. 6927.
 4. Firstov S. V., Alyshev S. V., Kharakhordin A. V., Riumkin K.E., Dianov E.M. Laser-induced bleaching and thermo-stimulated recovery of luminescent centers in bismuth-doped optical fibers // *Opt. Mater. Express.* – 2017. – Vol. 7. – Issue 9. – P. 3422.
 5. Firstov S. V., Alyshev S. V., Riumkin K.E., Khagai A.M., Kharakhordin A. V., Melkumov M.A., Dianov E.M. Laser-Active Fibers Doped with Bismuth for a Wavelength Region of 1.6-1.8 μm // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2018. – Vol. 24. – Issue 5.
 6. Erdogan T., Mizrahi V., Lemaire P.J., Monroe D. Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings // *J. Appl. Phys.* – 1994. – Vol. 76. – Issue 1. – P. 73–80.