

На правах рукописи



Фирстов Сергей Владимирович

**АКТИВНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ,
ЛЕГИРОВАННЫЕ ВИСМУТОМ, ДЛЯ ЭФФЕКТИВНЫХ
ЛАЗЕРОВ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА**

Специальность: 01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научный центр волоконной оптики Российской академии наук

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ

- Бабин Сергей Алексеевич** член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, врио директора, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук
- Попова Марина Николаевна** доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией Фурье-спектроскопии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук
- Ильичев Николай Николаевич** доктор физико-математических наук, зав. лабораторией нелинейной оптики примесных центров, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук
- Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится “29” октября 2018 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.03 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу: 119991 г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/disser/compet.php>

Автореферат диссертации разослан “___” _____ 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Т. Б. Воляк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Уникальные характеристики лазерного излучения стали основой стремительного практического использования лазеров в самых разных областях (телекоммуникации, медицине, наукоемких технологиях, оборонной промышленности, автомобилестроении и т.п.). Начиная с 1960 г. (после получения Мейманом первой лазерной генерации на кристалле рубина [1]), непрерывные исследования в области материаловедения, лазерной физики, фотоники и т.д. привели к тому, что в сейчас лазерное излучение может быть получено практически в любом участке спектра от УФ до среднего ИК диапазона. Однако метод его получения оказывается зачастую низкоэффективным, малопригодным для практического использования по ряду причин, одной из которых является отсутствие подходящей активной среды. Поэтому одной из важнейших задач лазерной физики является проведение исследований, направленных на поиск и изучение свойств новых лазерно-активных материалов.

Наряду с твердотельными лазерами на объемных элементах, особую популярность получили волоконные лазеры, создание которых связано с прогрессом в области волоконной оптики и лазерной физики. Первый лазер, в качестве активного элемента которого использовалось оптическое волокно из кварцевого стекла, легированного неодимом, был разработан Э. Снитцером в 1961 году [2]. Изначально в лазерах такого типа использовалась ламповая накачка, что обуславливало громоздкость, низкую эффективность и короткий срок службы. После перехода от ламповой к диодной (полупроводниковой) накачке, а также разработки методики формирования резонатора путем записи брэгговских решеток внутри волоконного световода стало возможным создавать полностью волоконные конфигурации таких лазеров с большим ресурсом работы (более 10000 ч), которые практически не нуждались в обслуживании в процессе эксплуатации. Это привело к интенсивному развитию направления, связанного с разработкой волоконных лазеров. Компактность, отсутствие элементов, требующих юстировки и водяного охлаждения, высокий КПД (до ~80%) преобразования излучения полупроводниковой накачки в лазерное излучение, высокая надежность, устойчивость к различным внешним воздействиям и др. предопределило появление широкого круга потенциальных применений волоконных лазеров.

Наиболее распространенными с точки зрения практической направленности стали волоконные лазеры, в которых рабочей средой служат световоды из кварцевого стекла, легированного ионами редкоземельных

металлов (Nd, Yb, Er, Tm, Ho), обладающих полосами усиления в спектральных областях, расположенных между 0.9 и 2.1 мкм. Однако лазеры на основе таких световодов эффективно генерируют излучение не во всей указанной области, а лишь в дискретных областях спектра, при этом значительная часть указанного диапазона длин волн, в частности, 1.15–1.5 мкм и 1.6–1.8 мкм остается непокрытой.

Не так давно было показано, что в спектральной области 1.15–1.5 мкм могут также быть реализованы эффективные источники лазерного излучения на основе волоконных световодов, легированных активными ионами. Этого удалось достичь благодаря использованию легированных висмутом волоконных световодов [3–8]. К моменту начала исследований в рамках данной диссертации висмутовые световоды являлись совершенно новой активной средой с уникальными спектрально-люминесцентными свойствами. Большинство свойств, относящихся к данному типу материалов, оставались малоизученными, включая механизм возникновения широкополосной люминесценции, являющейся одной из отличительных особенностей висмутосодержащих материалов.

Это послужило основой для проведения детальных исследований свойств таких материалов и решения ряда важных задач фундаментального характера, в частности определения основных спектрально-люминесцентных характеристик висмутовых центров, ответственных за ИК люминесценцию, в зависимости от типа стекляннной матрицы, поиска оптимальных условий изготовления световодов и способов повышения висмутовых активных центров, изучения фото- и термоиндуцированных процессов. Кроме того, возникла необходимость проведения поисковых исследований новых лазерно-активных сред на основе висмутовых световодов для области длин волн 1.6–1.8 мкм, поскольку данная спектральная область является привлекательной для различного круга практических применений (например, офтальмология [9], томография [10], телекоммуникация [11]). Все это определило актуальность и целесообразность проведения таких исследований.

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является поисковое исследование новых лазерных сред для ближней ИК области спектра на основе волоконных световодов, легированных висмутом, и проведение систематического комплексного изучения их оптических свойств. Создание на их основе эффективных устройств для генерации и усиления оптического излучения, изучение основных выходных характеристик таких устройств.

Для успешного достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Проведение детального исследования с применением различных спектроскопических методов и сравнительного анализа спектрально-люминесцентных свойств висмутовых волоконных световодов различного состава в широком диапазоне длин волн люминесценции и возбуждения.
2. Разработка новой активной среды для спектральной области 1.6–1.8 мкм на основе висмутовых высокогерманатных световодов. Определение наиболее подходящих условий изготовления, химического состава стеклянной матрицы, включая концентрацию активатора, таких световодов. Создание ряда устройств (волоконные лазеры непрерывного действия, оптический усилитель, суперлюминесцентный источник излучения) с заданными спектральными характеристиками на основе разработанных световодов. Изучение основных выходных характеристик реализованных устройств.
3. Исследование процессов фотоиндуцированных явлений, возникающих в висмутовых световодах различного состава под воздействием лазерного и ионизирующего излучений. Установление основных закономерностей такого рода явлений и выявление основных механизмов, ответственных за фотоиндуцированные процессы.
4. Изучение влияния температурной обработки на оптические свойства висмутовых световодов.
5. Поисковые исследования, направленные на получение новой активной среды со сверхширокой полосой оптического усиления (более 200 нм), на основе световода, легированного эрбием и висмутом.

Научная и практическая значимость работы

Проведено систематическое комплексное (с применением широкого круга спектроскопических методов) исследование оптических свойств нового типа лазерных сред, а именно висмутовых волоконных световодов различного состава. Полученные результаты могут использоваться при решении задач практического характера, в частности, связанных с построением оптических усилителей, лазеров и прочих устройств на основе висмутовых световодов.

Впервые в мире разработаны световоды, легированные висмутом, обеспечивающие оптическое усиление в спектральной области 1600–1800 нм. При детальном изучении выявлены закономерности влияния технологических условий синтеза, в частности содержания оксида германия, концентрации активатора, температуры и атмосферы в процессе проплавления пористых

стеклообразных слоев с висмутом, на формирование центров с полосой люминесценции в области 1700 нм.

На основе разработанных германосиликатных (с различным содержанием оксида германия) световодов созданы оптические устройства (волоконные лазеры, оптические усилители, суперлюминесцентный источник), работающие в спектральных областях 1400 и 1700 нм, в которых отсутствуют эффективные устройства на основе волоконных световодов с редкоземельными ионами. Полученные результаты расширяют спектр практического применения волоконных источников.

Впервые обнаружен оптический эффект (фотообесцвечивание), возникающий в висмутовых волоконных световодах, под воздействием лазерного излучения. Показана возможность обратного процесса при температурной обработке световодов. Выявлены основные закономерности их протекания. Предложены механизмы наблюдаемых явлений.

Впервые получены результаты по радиационной стойкости висмутовых световодов (для различных температурных диапазонов), которые могут быть использованы при создании специальных устройств на основе таких световодов.

Предложен способ повышения концентрации висмутовых активных центров в разработанных световодах, что позволяет сократить длину резонатора получаемых лазеров без существенного изменения их эффективности.

Разработана и изучена новая активная среда с полосой оптического усиления более 200 нм в диапазоне длин волн 1530–1775 нм. Реализован оптический усилитель с усилением не менее 10 дБ во всем указанном диапазоне длин волн (при накачке на длине волны 1460 нм и мощностью 350 мВт), имеющий большой потенциал практического использования в волоконно-оптических системах связи. Проявлен интерес к сотрудничеству в данном направлении со стороны крупных телекоммуникационных компаний, а именно Huawei (Китай), OFS (США).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Волоконный лазер на основе световода с сердцевиной из германосиликатного стекла, легированного висмутом, генерирует излучение на длине волны 1460 нм с эффективностью 50% и выходной мощностью 20 Вт.
2. Световоды с сердцевиной из германосиликатного стекла (с содержанием оксида германия более 40 мол.%) можно использовать в качестве активной среды для создания полностью волоконных оптических устройств:

- а) непрерывных волоконных лазеров, генерирующих излучение в области 1625–1775 нм с максимальной эффективностью 30%;
- б) 23-дБ волоконно-оптического усилителя с полосой усиления 40 нм (по уровню 3 дБ) в спектральной области 1695–1735 нм;
- в) суперлюминесцентного ИК источника со средневзвешенной длиной волны выходного излучения 1730 нм.
3. Лазерное излучение УФ и видимого диапазона инициирует спонтанно необратимые процессы разрушения (обесцвечивания) активных центров в высокогерманатных световодах с висмутом.
 4. Полное восстановление фотообесцвеченных лазерным излучением висмутовых активных центров, ассоциированных с германием и кремнием, достигается тепловой обработкой световодов в диапазоне температур 400–500 °С.
 5. Процесс периодического «стирания» (лазерно-индуцированного обесцвечивания) и «наведения» (термически активированного восстановления) активных центров реализуется в висмутовых высокогерманатных световодах.
 6. Эффективность формирования дополнительных лазерно-активных центров в световодах, легированных висмутом, зависит от параметров термической обработки и химического состава стекла сердцевины.
 7. Висмутовые высокогерманатные световоды после термообработки при температуре 600 °С могут использоваться для создания эффективных волоконных лазеров в области длины волны 1.7 мкм.
 8. Высокогерманатный световод с эрбием и висмутом обеспечивает оптическое усиление более 10 дБ во всей спектральной области от 1515 до 1775 нм при накачке на длине волны 1460–1480 нм и мощностью 350 мВт.

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов обеспечивается применением отработанных методов исследования волоконных световодов; использованием современного научного оборудования; сопоставлением данных, полученных различными методами; созданием реально работающих устройств, полученными патентами; а также современными методами анализа и интерпретации экспериментальных результатов.

Личный вклад диссертанта

Диссертационная работа является результатом многолетней работы автора в Научном центре волоконной оптики РАН (НЦВО РАН) и представляет собой обобщение работ автора, выполненных совместно с сотрудниками НЦВО РАН

и Института химии высокочистых веществ РАН (ИХВВ РАН). Коллективный характер экспериментальных работ обусловил публикацию полученных результатов в соавторстве с коллегами. В работах, включенных в диссертацию, автор внес определяющий вклад, включая формулирование задач исследования и пути их решения. Автор настоящей работы принимал непосредственное участие в разработке методов исследования, проведении экспериментов и обработке полученных результатов. Анализ, обобщение результатов и формулирование выводов работы проводились лично автором.

Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены и обсуждены на научных семинарах НЦВО РАН, ИОФ им. А.М. Прохорова РАН (Москва, Россия), Шанхайского института керамики КАН (Шанхай, Китай), Шанхайского института точной механики и оптики КАН (Шанхай, Китай). Часть публикаций диссертации вошли в цикл научных работ «Разработка эффективных висмутовых волоконных лазеров и усилителей для спектральной области 1280–1775 нм», который в 2014 году был признан лучшей научной работой молодого ученого РАН в области разработки или создания приборов, методик, технологий и новой научно-технической продукции научного и прикладного значения. Кроме того, новаторские работы в области изучения висмутовых волоконных световодов были отмечены наградой Оптического общества им. Д.С. Рождественского (в 2017 году автор получил медаль В.С. Летохова, присуждаемую молодым ученым).

Материалы диссертации также докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: The European Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO_Europe), May 2011, Munich (Germany); 23 th International Laser Physics Workshop (LPHYS), June 2014, Sofia, Bulgaria; European Conference on Optical Communication (ECOC), September 2014, Cannes, France; Frontiers in Optics, October 2015, San Jose, USA; Всероссийская конференция по волоконной оптике, Октябрь 2015, Пермь, Россия; European Conference on Optical Communication (ECOC), September 2015, Valencia, Spain; International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'15), September 2015, Faro, Portugal; Asia Communications and Photonics Conference (ACP'15), November 2015, Hongkong, China; Specialty Optical Fibers, November 2015, Hongkong, China; Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC'16), March 2016, Anaheim, USA; International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT'16), September 2016, Minsk, Belarus; 7-й Российский семинар по волоконным лазерам, Сентябрь 2016, Новосибирск, Россия; European Conference on Optical

Communication (ECOC), September 2016, Düsseldorf, Germany, CLEO Pacific Rim, August 2017, Singapore; Workshop on Specialty of Optical Fibers, October 2017, Limassol, Cyprus и др.

Работа выполнялась в рамках проектов РФФИ грант 15-32-20234-мол_а_вед, РФФИ грант 16-02-00440-а, РФФИ грант 16-32-80009-мол_эв_а, а также при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ (грант Президента), РФФИ грант 16-12-10230, Программа фундаментальных исследований Президиума РАН I.1П 0025-2015-0004 «Фундаментальные исследования по разработке эффективных активных сред на основе легированных висмутом волоконных световодов и создание новых волоконных лазеров и оптических усилителей в ближней инфракрасной области спектра», в рамках договора НИР (№ 7894734) с АУ «Технопарк – Мордовия».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 43 работы (список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата), из которых 21 опубликована в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ + 1 патент РФ (А1-А22); 20 работ опубликовано в трудах всероссийских и международных конференций (А24-А43).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 252 страницы, включая 132 рисунка, 13 таблиц и библиографию из 226 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **Главе I** представлен обзор (по опубликованным другими авторами результатам) существующих активных волоконных световодов на основе кварцевого стекла, используемых для создания эффективных лазеров, излучающих в ближнем ИК диапазоне. Рассмотрены основные оптические и генерационные характеристики волоконных световодов, легированных ионами редкоземельных элементов.

Также приводится подробное описание спектрально-люминесцентных свойств и способов получения световодов, легированных висмутом. Показано,

что висмутовые световоды, обладающие уникальными спектрально-люминесцентными свойствами, можно использовать в качестве активных сред для волоконных лазеров и усилителей в спектральной области 1150–1550 нм. Приведено описание специфических особенностей висмутовых волоконных световодов. Из анализа опубликованных результатов были сформулированы основные проблемы и направления исследований в области изучения и разработки висмутовых волоконных световодов и эффективных устройств на их основе.

Глава II посвящена описанию параметров экспериментальных образцов, технологии их изготовления, основных методов исследования спектрально-люминесцентных свойств висмутовых световодов различного химического состава, а именно, легированных висмутом световодов с сердцевинной из чистого кварцевого стекла, алюмо-, фосфо- и германосиликатного стекла. В результате проведенного исследования были определены основные полосы поглощения и люминесценции, относящиеся к висмутовым активным центрам, ассоциированным с кремнием/германием/фосфором (ВАЦ-Si/Ge/P) (пункты 2.2–2.3).

В пункте 2.4 основное внимание было уделено изучению оптических свойств висмутовых германосиликатных световодов с различным содержанием оксида германия (от 5 до 95 мол.%), поскольку такие световоды рассматривались в качестве потенциальных активных сред для спектральной области 1600–1800 нм. Одним из основных результатов исследования стало то, что в отличие от оксида фосфора и алюминия, которые даже при небольших количествах (1–2 мол.%) сильно изменяют люминесцентные свойства световодов, введение оксида германия (до 10 мол.%) в сердцевину световода оказывает слабое влияние на формирование и свойства висмутовых активных центров (ВАЦ-Si) с полосой усиления в области 1400 нм.

Также было установлено, что введение оксида германия (более 30 мол.%) приводит к появлению новых полос поглощения, максимумы которых расположены на длинах волн 1650, 925 и 460 нм. При возбуждении в указанные полосы поглощения наблюдается ИК люминесценция с максимумом около 1700 нм. Типичные спектры поглощения и люминесценции (при возбуждении в полосу поглощения ВАЦ-Ge) световода с сердцевинной из $\approx 50\text{GeO}_2\text{--}50\text{SiO}_2$ стекла, легированного висмутом, показаны на Рис. 1(а). На данном графике также приведены экспериментально полученные значения ненасыщаемых потерь (определяемых как остаточный уровень потерь в световоде при накачке выше интенсивности насыщения ВАЦ) в световодах такого типа для разных длинах волн.

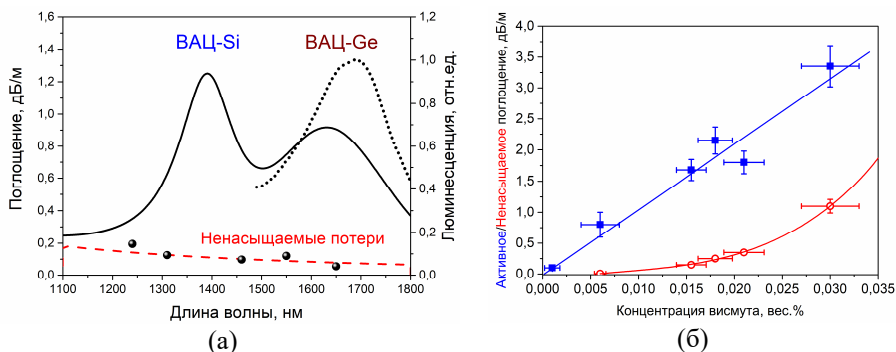


Рис. 1 а) Типичные спектры поглощения (сплошная линия) и люминесценции (пунктирная линия) световода с сердцевинной из $\approx 50\text{GeO}_2\text{-}50\text{SiO}_2$ (мол.%), легированного висмутом. Шариками показаны экспериментально полученные значения ненасыщаемых потерь (аппроксимация – штриховая линия). б) Зависимости активного (квадраты) и ненасыщаемого поглощения (кружки) от концентрации висмута в сердцевине световода.

Видно, что величина ненасыщаемых потерь составляет $\approx 10\text{--}15\%$ от общего уровня поглощения слабого сигнала. Важно также отметить, что величина ненасыщаемых потерь примерно на порядок выше, чем уровень собственных потерь нелегированной стеклянной матрицы (в области 1600 нм). Для детального изучения влияния общей концентрации Вi на величину активного поглощения (концентрацию активных центров) ВАЦ-Ge и ненасыщаемого поглощения была изготовлена серия световодов $\approx 50\text{GeO}_2\text{-}50\text{SiO}_2$, легированных висмутом в диапазоне концентраций от $2 \cdot 10^{-3}$ до $30 \cdot 10^{-3}$ вес.%. Величина поглощения, принадлежащая висмутовым активным центрам, рассчитывалась путем вычитания величины ненасыщаемого поглощения из поглощения малого сигнала на длине волны 1650 нм. Полученные зависимости показаны на Рис. 1(б). Видно, что поглощение ВАЦ растет линейно с ростом концентрации висмута. Обратная ситуация с концентрационными зависимостями ненасыщаемого поглощения, которые описываются исключительно степенными функциями с показателями больше 1. Важно отметить, что при увеличении температуры спекания пористого слоя на фоне заметного уменьшения количества ВАЦ происходит существенное снижение ненасыщаемых потерь. Из анализа полученных концентрационных зависимостей поглощения ВАЦ и ненасыщаемых потерь следует, что существуют две области концентраций: 1) скорость роста поглощения, обусловленного ВАЦ, сопоставима или превышает скорость роста ненасыщаемых потерь; 2) скорость роста ненасыщаемого поглощения больше аналогичной для поглощения ВАЦ. Исходя из этого, становится очевидным, что существует оптимальная концентрация висмута, превышение которой

нецелесообразно, т.к. начинается преимущественный рост ненасыщаемых потерь, что приводит к снижению эффективности усиления световодов (Рис. 2).

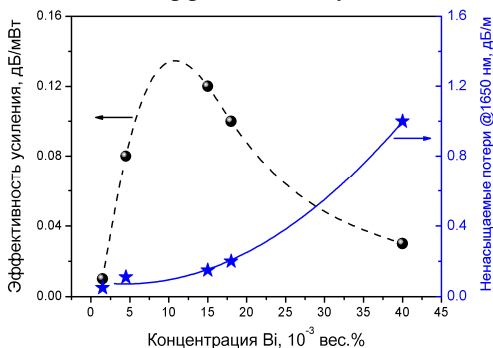


Рис. 2 Эффективность оптического усиления в области 1700 нм (шарики) и ненасыщаемое поглощение (звезды) от концентрации висмута.

Видно, что с ростом концентрации висмута эффективность усиления монотонно повышается до величины 0,12 дБ/МВт. При этом не наблюдается существенного увеличения ненасыщаемых потерь. Дальнейшее повышение концентрации висмута приводит к резкому снижению эффективности усиления в результате возрастания ненасыщаемых потерь. Таким образом, существует оптимальное содержание висмута, которое составляет $\approx 0,01$ вес.%, зависящее от условий изготовления, в частности температуры спекания пористых стеклообразных слоев в процессе изготовления заготовки световода.

В Главе III рассмотрены новые явления, в частности фотообесцвечивание и термоиндуцированное восстановление активных центров в висмутовых волоконных световодах. Явление фотообесцвечивания заключается в разрушении активных центров, сопровождающееся снижением интенсивности полос поглощения и люминесценции, характерных для данного типа центров. Впервые явление фотообесцвечивания висмутовых активных центров было обнаружено нами при облучении лазерным излучением УФ диапазона ($\lambda = 244$ нм). Результаты следующих экспериментов показали, что фотообесцвечивание ВАЦ может также возникать при воздействии лазерного излучения на длине волны 532 нм (пункт 3.1). Большая часть экспериментов по изучению фотообесцвечивания была проведена с помощью данного лазерного излучения.

На Рис. 3 показаны измеренные спектры поглощения до и после облучения излучением с длиной волны 532 нм и интенсивностью около 1 МВт/см² в течение 15 часов. В спектре поглощения исходного висмутового световода наблюдается совокупность полос, принадлежащих висмутовым активным центрам, которые полностью исчезают после облучения. Тем не менее следует

отметить, что спектр потерь облученного волокна по-прежнему имеет неструктурированное поглощение во всем измеренном спектральном диапазоне, которое по своему виду подобно спектральной зависимости ненасыщаемых потерь.

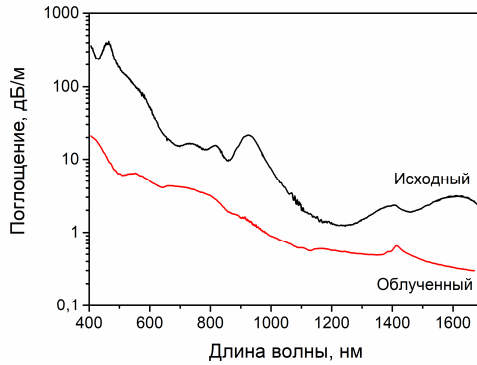


Рис. 3 Спектры исходного и облученного (более 15 часов) световодов. Облучение осуществлялось излучением на 532 нм с интенсивностью около 1 МВт/см².

На Рис. 4(а) приведена типичная зависимость интенсивности люминесценции на 1700 нм ВАЦ-Ge от времени облучения. Видно, что процесс происходит достаточно интенсивно во временном интервале до 1000 с. Дальнейшее увеличение времени облучения не приводит существенным изменениям люминесценции (уровень насыщения). Полученная зависимость с хорошей точностью описывается функцией вида

$$I(t) = I_{\text{насыщ}} + (I_{\text{нач}} - I_{\text{насыщ}}) \cdot e^{-(t/\tau)^\beta},$$

где I – интенсивность люминесценции через промежуток облучения t ; $I_{\text{нач}}$ и $I_{\text{насыщ}}$ – начальный и остаточный (после насыщения) уровень интенсивности люминесценции; $0 \leq \beta \leq 1$ – параметр подгонки; τ – характерное время.

В результате были определены характерные времена τ фотообесцвечивания ВАЦ. Оказалось, что время фотообесцвечивания зависит от интенсивности используемого лазерного излучения. На вставке Рис. 4(а) в двойном логарифмическом масштабе приведены экспериментальные данные $1/\tau$ (скорости фотообесцвечивания) от интенсивности лазерного излучения на 532 нм. Видно, что полученная зависимость с хорошей точностью аппроксимировалась линейной функцией с углом наклона 2, указывая на то, что для активации процесса фотообесцвечивания требуется минимум два фотона с длиной волны 532 нм.

Показано, что скорость обесцвечивания ВАЦ-Ge существенно снижается при уменьшении энергии кванта излучения. При использовании лазерного

излучения с длиной волны, превышающей 1000 нм, эффект обесцвечивания не был обнаружен. Из этого следует, что висмутовые активные центры являются устойчивыми к собственному (генерируемому) лазерному излучению и излучению накачки.

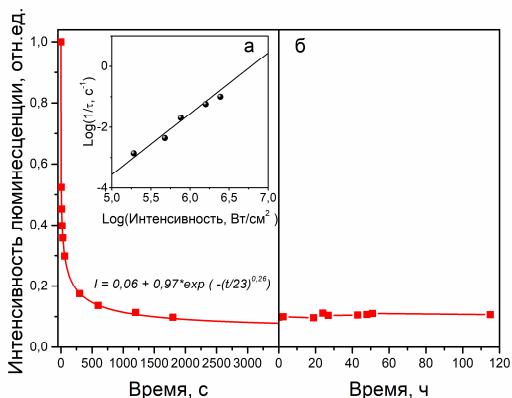


Рис. 4 Типичная временная зависимость интенсивности люминесценции на длине волны 1700 нм в процессе облучения лазерным излучением на 532 нм (а) и после облучения при комнатной температуре (б). На вставке (а) показана зависимость скорости фотообесцвечивания ВАЦ-Ge от интенсивности излучения в двойном логарифмическом масштабе (точки). Линией показана квадратичная функция.

Безусловно, что при изучении процесса фотообесцвечивания ВАЦ было интересным провести подобные исследования для ВАЦ, формирующихся в других типах висмутовых световодов. В результате было обнаружено, что наиболее чувствительными к лазерному излучению являются ВАЦ-Ge и ВАЦ-Si, которые почти полностью обесцвечиваются. Для ВАЦ-P характерным является снижение скорости процесса и рост числа устойчивых центров. Люминесцентные свойства алюмосиликатных световодов (ВАЦ-Al), практически не изменяются во время облучения. Предполагается, что стабильность ВАЦ в алюмосиликатном стекле при воздействии лазерного излучения обусловлена совершенно иной структурой центров, которая отлична от структуры ВАЦ-Ge.

В данной работе также исследовалось наличие возможных процессов спонтанного восстановления (спонтанной обратимости) люминесцентных свойств висмутовых световодов при комнатной температуре. На Рис. 4(б) показана зависимость интенсивности люминесценции облученного световода при комнатной температуре от времени наблюдения. Видно, что спонтанного изменения (в пределах точности измерения) интенсивности люминесценции на 1700 нм не происходит, что свидетельствует о стабильности фотоиндуцированных модификаций сетки стекла.

В пункте 3.2 приводятся экспериментальные данные о процессах восстановления спектрально-люминесцентных свойств облученных световодов с висмутом при термообработке. Экспериментально установлено, что температура нагрева оказывает сильное влияние на уровень интенсивности фотолюминесценции, который может быть достигнут после охлаждения. В частности, на Рис. 5 приведены экспериментально полученные зависимости интенсивности люминесценции ВАЦ-Ge для облученных легированных висмутом световодов, нагретых до разных температур и медленно охлажденных.

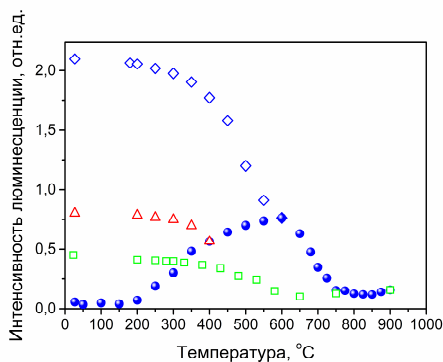


Рис. 5 Зависимости интенсивности люминесценции на длине волны 1700 нм облученных световодов в процессе нагрева (шары) до различных температур и остывания (400 °C – треугольники; 600 °C – ромбы; 900 °C – квадраты). Поскольку кривые нагрева совпадали, то на графике показан только нагрев до 900 °C для наглядности.

Видно, что увеличение температуры нагрева оказывает сильное влияние на величину интенсивности ИК люминесценции. А именно, при нагреве световода до температуры 400 °C интенсивность люминесценции не восстанавливается до исходного уровня даже после медленного охлаждения. При нагреве до 600 °C наблюдается наиболее интенсивный прирост люминесценции после остывания. В случае же $T > 600$ °C интенсивность люминесценции даже в процессе нагрева начинает резко снижаться. А после охлаждения ее уровень интенсивности становится ниже по сравнению с величиной люминесценции исходного световода. На Рис. 6 показаны спектры люминесценции световода до и после облучения, а также после термической обработки. Существенных различий в форме спектров люминесценции исходного образца и образца после отжига обнаружено не было.

Из анализа полученных экспериментальных данных можно заключить, что, во-первых, интенсивность люминесценции в области 1700 нм возрастает из-за формирования новых активных центров (корреляция между полосами

люминесценции и поглощения), а во-вторых, что в отличие от ВАЦ-Ge дополнительного прироста количества ВАЦ-Si не происходит.

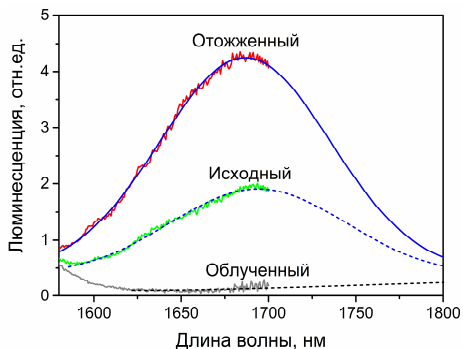


Рис. 6 Спектр люминесценции исходного, облученного и термически обработанного световода.

Полученные результаты коррелируют с результатами работы [12], в которой было показано, что в германосиликатных световодах с висмутом (с низким содержанием оксида германия) при нагреве происходит повышение полюс поглощения, принадлежащих к ВАЦ-Ge.

Кроме того, исследовалась возможность повторного фотообесцвечивания ВАЦ в световодах после термообработки. Экспериментальные данные, отражающие основной результат исследований, приведены на Рис. 7.

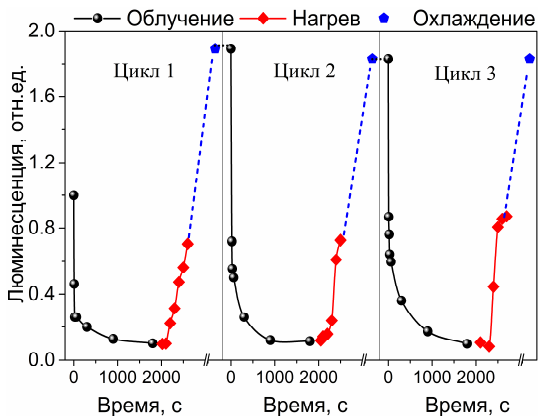


Рис. 7 Цикличность процессов фотопроектирования-восстановления ВАЦ-Ge. Интенсивность люминесценции на 1700 нм для лазерного обесцвечивания/ нагрева представлены шарами/ромбами, соответственно. Изменения люминесценции, происходящие на стадии остывания, показаны пунктирными линиями.

Оказалось, что ВАЦ-Ge можно периодически «стирать» и «записывать». На приведенном графике показано несколько циклов «записи» и «стирания»,

основанные на изменении интенсивности люминесценции на 1700 нм. Видно, что после первого цикла происходит удвоение интенсивности люминесценции как результат формирования дополнительных активных центров. Дальнейшее воздействие лазерного излучения или температурной обработки позволяют достигать подобных показателей с небольшими изменениями. Повторное лазерное воздействие подобным же образом оказывает влияние на люминесцентные свойства ВАЦ, что и в случае с исходными световодами. Следовательно, дополнительно формирующиеся в процессе отжига световодов висмутовые центры в полной мере обладают свойствами ВАЦ-Ge. На основе экспериментальных результатов предложен основной механизм фотообесцвечивания ВАЦ-Ge, который заключается в разрушении (фотоионизации) кислородно-дефицитного дефекта сетки стекла GeODC, находящегося в окрестности иона висмута и участвующего в формировании ВАЦ-Ge. В этом случае структурные модификации сетки стекла являются результатом двухквантового процесса в случае 532 нм или одноквантового для 244 нм, подобно тем, что возникают в процессе записи брэгговских решеток. Это подтверждается результатами спектроскопии спонтанного комбинационного рассеяния. Как показано выше, для активации обратного процесса (процесса восстановления) требуется нагрев до небольших температур, которые не оказывают существенного влияния на структуру германосиликатного стекла. Исходя из экспериментально полученной зависимости скорости восстановления от $1/T$, нами была оценена энергия активации процесса восстановления. Полученная величина составляет 0.3 эВ. Низкое значение энергии активации, вероятнее всего, вызвано тем, что фотоэлектрон, образовавшийся при разрушении GeODC, захватывается неглубокой ловушкой. В качестве ловушек могут выступать и ионы висмута. Однако в этом случае захват электрона должен приводить к изменению степени окисления иона висмута и, как следствие, к изменению оптических характеристик. Поиск новых полос поглощения и люминесценции, которые могли бы быть связаны с ионами висмута, не дал положительных результатов. Это согласуется с экспериментальными данными о термолюминесценции в легированных висмутом волокнах, где было обнаружено, что Ви-ассоциированные ловушки в германосиликатных волокнах не образуются [13]. С другой стороны, ловушки могут быть образованы в самой стеклянной матрице. В частности, четырехкоординированный германий может выступать в качестве подобной ловушки. В таком случае в результате захвата электрона происходит формирование новых дефектных центров (например, Ge (1), Ge (2)) [14]. Применение низкоэнергетического воздействия является достаточным для их релаксации и обратной локальной перестройке сетки стекла. Это, в свою

очередь, приводит к регенерации GeODC и активации люминесцентных центров, что подтверждается корреляцией между изменением количества ВАЦ-Ge и GeODC.

Следует также отметить, что кроме эффектов фотообесцвечивания ВАЦ в висмутовых световодах с высоким содержанием оксида германия происходят процессы, приводящие к появлению новых полос поглощения, в частности, полосы с максимумом около 1200 нм. Данная полоса возникает при облучении излучением на 532 нм и при воздействии гамма излучения (пункт 3.3). Из температурных и временных зависимостей наведения и релаксации радиационно-наведенной полосы поглощения определены энергия активации (≈ 40 мэВ) дефектных центров, ответственных за полосу 1200 нм, и порядок кинетики ($n \sim 3$), характеризующий природу протекающих процессов в стекле. Из полученных результатов следует, что данную полосу не следует относить исключительно к дефектам сетки стекла или висмутовым активным центрам. Она имеет более сложную природу.

В **Главе IV** представлены результаты, касающиеся разработки эффективных волоконных лазеров, усилителей, суперлюминесцентного источника на основе висмутовых световодов, работающих в различных областях ближнего ИК диапазона. Также приводятся результаты экспериментального исследования и численного моделирования по получению лазерной генерации в высокогерманатных световодах, легированных висмутом, после термической обработки.

В пункте 4.1 изложены результаты исследования параметров непрерывных висмутовых волоконных лазеров для спектральной области 1280–1800 нм. Сначала рассматриваются характеристики висмутовых волоконных лазеров, работающих на длинах волн 1280, 1330, 1340 и 1360 нм. Показано, что для всех конфигураций лазеров (вне зависимости от величины коэффициента отражения выходного зеркала) пороговая мощность, необходимая для получения генерации, была достаточно низкой — около 100 мВт. Измеренные зависимости выходной мощности лазеров от мощности накачки отклоняются от линейного закона. Степень нелинейности зависит от коэффициента отражения выходного зеркала и длины волны генерации. Исходя из уровня мощности накачки, можно выделить две характерные области: для мощностей накачки до 5 Вт и выше 5 Вт. В первой области, как правило, лазеры работают с эффективностью примерно в два раза ниже, чем во второй области. Следует также отметить, что при низкой величине коэффициента отражения (3.5%) эффективность лазеров была заметно ниже, чем для резонаторов с более высокими коэффициентами отражения (25–50%). Причина этого заключается в том, что уменьшение коэффициента отражения выходного зеркала должно

приводить, с одной стороны, к увеличению выходной мощности, а с другой, к ее уменьшению из-за возрастания потерь в резонаторе. В данном случае коэффициент отражения 50% для выходной брэгговской решетки является близким к оптимальному значению. Этим также объясняется наблюдаемое снижение эффективности лазеров при использовании решеток с более низкими, чем 50%, коэффициентами отражения. В результате максимально достигнутая дифференциальная эффективность висмутовых волоконных лазеров в области 1280–1360 нм составляет 50% по отношению к введенной мощности накачки. Данное значение было получено для висмутового волоконного лазера, генерирующего на длине волны 1330 нм, с коэффициентом выходного зеркала 50%. Максимальная выходная мощность данного лазера, полученная в эксперименте, составляла 10.6 Вт при мощности накачки 28.8 Вт.

В данном пункте также приведены результаты по реализации висмутовых лазеров, генерирующих излучение в области 1400–1500 нм, с рекордными значениями эффективности. Впервые лазерная генерация в области 1400–1500 нм была получена с применением легированных висмутом фосфорогерманосиликатных световодов [6]. Детальное изучение спектрально-люминесцентных свойств световодов, легированных висмутом, показало, что излучательные переходы в указанной спектральной области относятся к ВАЦ-Si. Подтверждением этого стало получение лазерной генерации в световоде, не содержащем других добавок кроме висмута [15]. Однако эффективность таких лазеров была на уровне 7–12%. Это было связано с проблемами технологического характера, в частности для получения световедущей структуры с сердцевинной из чистого кварцевого стекла требовалось создание отражающих оболочек с использованием фторсодержащего стекла или фотонно-кристаллической структуры вокруг сердцевины световода. Это усложняло конструкцию световода и создавало определенные сложности на стыковке со связными световодами (типа SMF-28). Необходимо также отметить, что дополнительные стадии технологического процесса также могли оказывать влияние на количество висмутовых активных центров, а, как следствие, на эффективность усиления таких световодов.

В ходе изучения оптических свойств висмутовых световодов было показано, что добавка оксида германия в небольших количествах (до 10 мол.%) в кварцевое стекло не оказывает существенного влияния на спектрально-люминесцентные характеристики формирующихся ВАЦ-Si. При этом известно, что введение оксида германия повышает показатель преломления стекла сердцевины. Это исключает необходимость использования специальных отражающих оболочек. На основе разработанного световода был изначально создан волоконный лазер, генерирующий на длине волны 1460 нм. Длина

активного световода составляла 94 м. Выходным зеркалом служил сколотый торец активного световода.

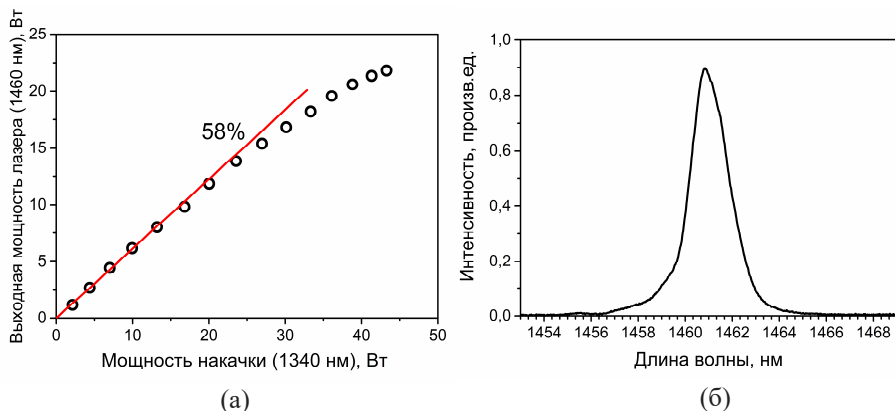
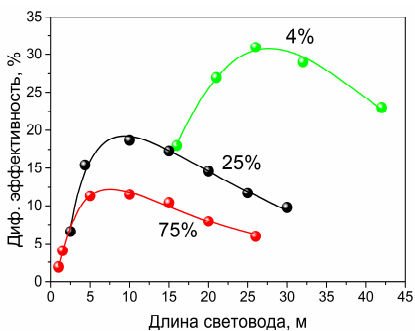


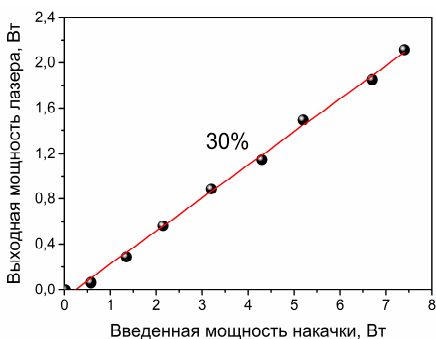
Рис. 8 Зависимость выходной мощности от введенной мощности накачки на 1340 нм (а) и спектр линии генерации (б) лазера на 1460 нм.

В качестве источника накачки использовался волоконный рамановский лазер с длиной волны генерации 1340 нм. Основные характеристики висмутового лазера представлены на Рис. 8. Видно, что выходная мощность лазера на начальном участке (до 15 Вт) изменяется линейно с мощностью накачки. Дифференциальная эффективность такого лазера составляет 58% (Рис. 8(а)). С увеличением мощности накачки наклон полученной зависимости уменьшается, что, скорее всего, связано с тепловыми эффектами. Тем не менее максимальная мощность, полученная в эксперименте, превышает уровень 20 Вт. Полная эффективность от введенной мощности накачки составляет 50%. На Рис. 8(б) изображен спектр линии генерации висмутового лазера. Ширина линии генерации составляет ≈ 2 нм.

Основное внимание было уделено рассмотрению генерационных характеристик висмутовых световодов, излучающих в области длин волн ≈ 1.7 мкм, поскольку такие активные среды разработаны впервые в мире. Как для всех висмутовых лазеров, рассмотренных выше, изучение лазерных свойств высокогерманатных световодов с висмутом проводилось с использованием линейной схемы с резонатором, состоящим из двух брэгговских решеток на длине волны 1700 нм и активного световода. В данном случае генерационные свойства световодов исследовались в различных конфигурациях резонатора лазера. В частности, проводилось изменение длины активного световода и коэффициента отражения выходного зеркала (4, 25 и 75%). В качестве источника накачки использовался волоконный эрбий-иттербиевый лазер с длиной волны генерации 1568 нм и выходной мощностью более 7 Вт.



(а)



(б)

Рис. 9 а) Зависимости дифференциальной эффективности висмутовых лазеров, генерирующих на длине волны 1700 нм, от длины активного световода для различных коэффициентов отражения выходного зеркала; б) зависимость выходной мощности лазера на 1700 нм от введенной мощности накачки

На Рис. 9(а) показаны полученные зависимости дифференциальной эффективности разработанных висмутовых лазеров от длины активного световода для различных коэффициентов отражения выходного зеркала. Видно, что в отличие от лазеров, работающих в области длин волн 1300 нм, эффективность лазеров на ≈ 1700 нм становится заметно выше с уменьшением коэффициента отражения выходной решетки. Для таких лазеров типичным также является сильная зависимость их эффективности от длины активного световода. С увеличением коэффициента отражения выходного зеркала оптимальная длина активного световода уменьшается. Такое поведение вполне объяснимо: чем более закрытый резонатор, тем меньше усиления требуется для достижения условия возникновения генерации, что при прочих равных условиях ведет к сокращению длины активного световода. Пороговая мощность таких лазеров была низкой и составляла несколько десятков мВт. Необходимо также отметить, что лазерная генерация на 1700 нм была получена на достаточно коротких отрезках активного волокна (около 1 м). Максимальная эффективность, достигнутая в лазере с резонатором, состоящим из активного световода длиной 27 м, высокоотражающей ($\approx 100\%$) брэгговской решетки и сколотого торца световода с коэффициентом отражения $\approx 4\%$, составляла $\approx 30\%$. Типичная зависимость выходной мощности лазерной генерации таких лазеров от мощности накачки представлена на Рис. 9(б). Видно, что полученная зависимость имеет линейный вид во всей области измерений. Максимальная мощность лазерной генерации достигает более 2 Вт.

В пункте 4.2 подробно рассмотрены оптические и генерационные свойства термически обработанных волоконных световодов, легированных висмутом, с сердцевиной из высокогерманатного стекла. На Рис. 10 приведены трехмерные

графики люминесценции-возбуждения исходного световода (а) и световода, нагретого до температуры 600 °С и охлажденного до комнатной температуры (б).

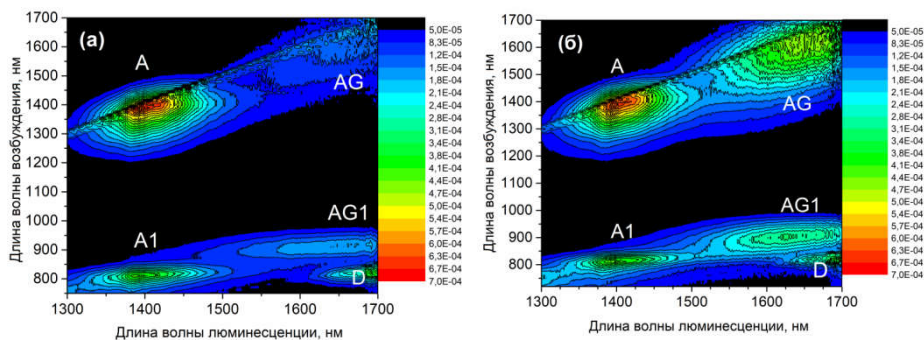


Рис. 10 Трехмерные графики люминесценции-возбуждения исходного световода (а) и световода, нагретого до температуры 600 °С и охлажденного до комнатной температуры (б).

Результаты сравнительного анализа полностью подтверждают факт о том, что отжиг таких световодов приводит к формированию дополнительных ВАЦ-Ge. Это хорошо видно на представленных графиках. На обоих графиках можно наблюдать 4 максимума, относящихся к активным центрам: А и А1 к ВАЦ-Si, АГ и АГ1 к ВАЦ-Ge. Пик D в обоих случаях является вторым порядком полосы люминесценции с максимумом на длине волны 830 нм, относящейся к ВАЦ-Si. Следует отметить, что интенсивность люминесценции ВАЦ-Si практически на порядок превосходит интенсивность люминесценции ВАЦ-Ge в световоде до отжига. Видно, что после отжига интенсивность максимумов А и А1 остается неизменной, тогда как интенсивность максимумов АГ и АГ1 увеличивается более чем в 2 раза. Следует также отметить, что других изменений люминесцентных свойств обнаружено не было. В данном пункте обсуждаются возможные физические причинно-следственные механизмы наблюдаемого эффекта. Нет сомнений, что стеклянная матрица оказывает значительное влияние на формирование ВАЦ-Ge, поскольку подобные явления не наблюдаются в световодах, содержащих ВАЦ, ассоциированных с А1, Р или Si. При изучении процессов фотообесцвечивания подчеркивалось, что лазерно-активный центр в высокогерманатном световоде (с GeO₂ более 40 мол.%) является восстановленный ион висмута, находящийся в определенном локальном окружении, в частности в окрестности кислородно-дефицитного дефекта стекла. Очевидно, что не все потенциально активные ионы висмута могут иметь необходимое локальное окружение в стеклянной матрице, даже если оно является энергетически выгодным. Одной из причин этого может быть

то, что ионы висмута располагаются в неравновесных состояниях (вмороженных в структуру стекла), которые образуются при ударном охлаждении ($\sim 10\,000\text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$) в процессе вытяжки световода.

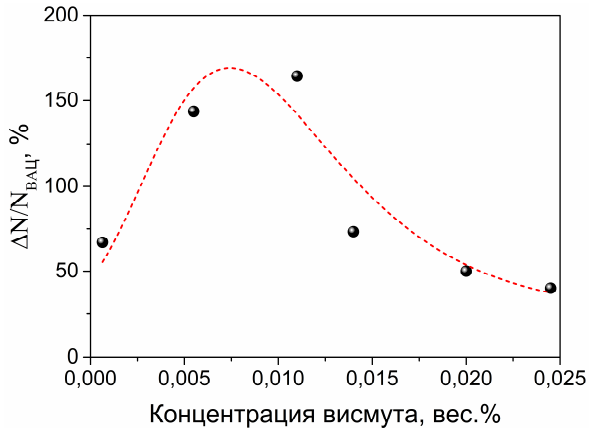


Рис. 11 Относительный прирост содержания ВАЦ-Ge в световодах после термообработки для различных концентраций висмута. Аппроксимация – штриховая линия.

Хорошо известно, что высокая температура, напряжения, инертные (или восстановительные) условия и скорость охлаждения могут оказывать влияние на состояние прекурсоров для формирования GeODC в волокнах $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ [16]. Отжиг является движущим фактором для инициирования частичной релаксации вмороженных состояний стекла, что позволяет генерировать новые GeODC. В результате посредством термической обработки мы можем добиться увеличения содержания ВАЦ в германосиликатных волокнах, легированных висмутом, в результате генерации новых GeODC. Это подтверждается корреляцией между зависимостями прироста количества ВАЦ-Ge и GeODC в германосиликатных световодах [17].

Из экспериментальных данных был оценен относительный прирост концентрации ВАЦ-Ge ($\Delta N/N$) после термообработки в световодах с различным содержанием Вi (Рис. 11). Следует отметить, что во всех исследованных образцах наблюдалось повышение ВАЦ-Ge. Видно, что максимальное увеличение количества ВАЦ-Ge происходит, если общая концентрация висмута не превышает ≈ 0.01 вес.% (Это значение, вероятно, справедливо только для конкретных технологических условий, которые использовались при изготовлении данных световодов). Максимальный прирост количества ВАЦ-Ge, которого удалось добиться, составляет $\approx 150\%$. При концентрации Вi выше 0.01 вес.% термоиндуцированное формирование новых ВАЦ-Ge резко снижается. Наблюдаемое поведение можно объяснить следующим образом:

1) уменьшение $\Delta N/N$ при высоких концентрациях висмута обусловлено сокращением количества одиночных потенциально активных ионов висмута в стеклянной матрице из-за эффектов кластеризации, возрастающих с ростом общей концентрации висмута; 2) уменьшение $\Delta N/N$ при низких концентрациях висмута связано с низким количеством потенциально активных ионов висмута.

С учетом анализа полученных результатов был выбран термически обработанный световод для проведения генерационных экспериментов. Важно отметить, что нагрев до 600 °С не приводит к заметному снижению механической прочности световода, даже несмотря на отсутствие защитного покрытия, что является несомненным преимуществом при работе с ним. Предполагалось, что при таком подходе световоды после отжига будут обладать улучшенным соотношением поглощения ненасыщаемых потерь к полному поглощению (которое напрямую связано с эффективностью усиления световода), чем световоды с аналогичными параметрами, полученные простым повышением концентрации висмута. Данное предположение основывалось на том, что изначально в таких световодах содержится малое количество висмута, что в результате при прочих равных условиях должно приводить к меньшему количеству кластерных форм висмута, а следовательно, к более низкой величине ненасыщаемых потерь.

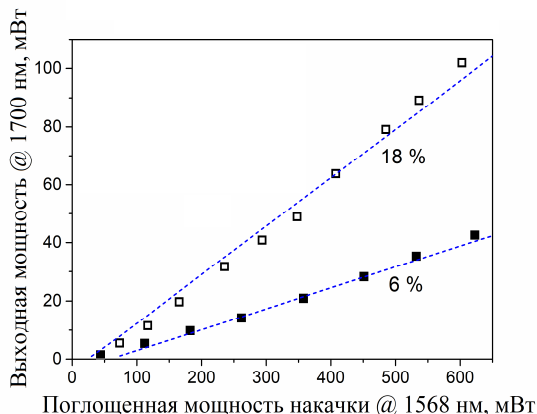


Рис. 12 Зависимость выходной мощности лазеров от поглощенной мощности накачки (квадраты – экспериментальные данные для световода после термообработки (закрашенные) и исходного световода с близкими характеристиками (закрашенные)). Пунктирная линия – данные численного расчета.

На Рис. 12 представлены зависимости выходной мощности лазеров, работающих на 1705 нм, от поглощенной мощности накачки. Оба лазера имеют низкую пороговую мощность (< 30 мВт). Максимальная выходная мощность лазера на основе световоде после термообработки составляет более 100 мВт

при поглощенной мощности накачки 600 мВт. Дифференциальная эффективность такого лазера достигает 18%, что в несколько раз больше, чем у висмутового волоконного лазера ($\approx 6\%$) с использованием световода с аналогичным поглощением, достигнутым повышением общей концентрации висмута. Полученный результат объясняется наличием более низкого уровня ненасыщаемых потерь в термически обработанном световоде по сравнению с волокном, имеющим аналогичное значение поглощения, достигнутого благодаря введению более высокой концентрации висмута. Это подтверждается результатами численного моделирования работы непрерывных висмутовых лазеров на основе скоростных уравнений (Рис. 12). Таким образом, предложен способ получения световодов с высоким содержанием ВАЦ-Ge без введения большого количества висмута.

Пункт 4.3 содержит результаты по созданию и исследованию характеристик суперлюминесцентного волоконного источника ИК излучения (СВИ) для спектральной области 1600–1800 нм на основе висмутового световода. Источник был реализован с использованием однопроходной схемы с накачкой на длине волны 1550 нм. Спектры излучения разработанного СВИ для различных мощностей (от 0.5 до 7 мВт) на выходе изображены на Рис. 13.

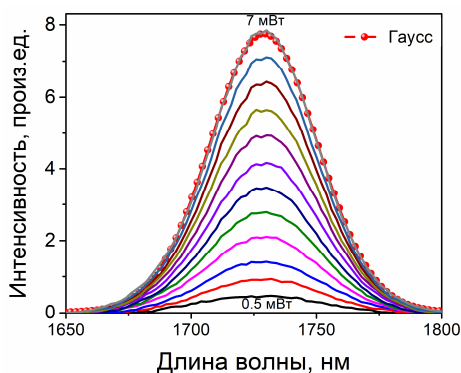


Рис. 13 Спектры излучения СВИ для выходной мощности от 0.5 до 7 мВт

Следует отметить, что спектр излучения имеет колоколообразную форму, которая с хорошей точностью аппроксимируется гауссовой кривой (функция Гаусса для сравнения также представлена на Рис. 13). Видно, что максимум выходного излучения, расположенный на ≈ 1730 нм, так же как средневзвешенная длина волны, слабо зависит от мощности накачки. Иная ситуация с шириной спектра излучения СВИ – при увеличении мощности накачки происходит сужение спектра излучения, что является типичным для таких устройств. Полученная ширина спектра излучения СВИ при

максимальной выходной мощности составляет ≈ 50 нм, что почти в 2 раза превосходит ширину ранее разработанных СВИ на висмутовых световодах. Максимально достигнутая мощность составляет 7 мВт при мощности накачки 650 мВт. Пороговая мощность накачки в этом случае не превышала 50 мВт. Также были проведены детальные исследования параметров СВИ при воздействии температуры (в диапазоне от -60 до $+60$ °С) и ионизирующего излучения (с дозами до 1 кГр). Полученные результаты могут быть использованы для практических целей, в частности, при реализации волоконно-оптических устройств, используемых в космической промышленности и т.д.

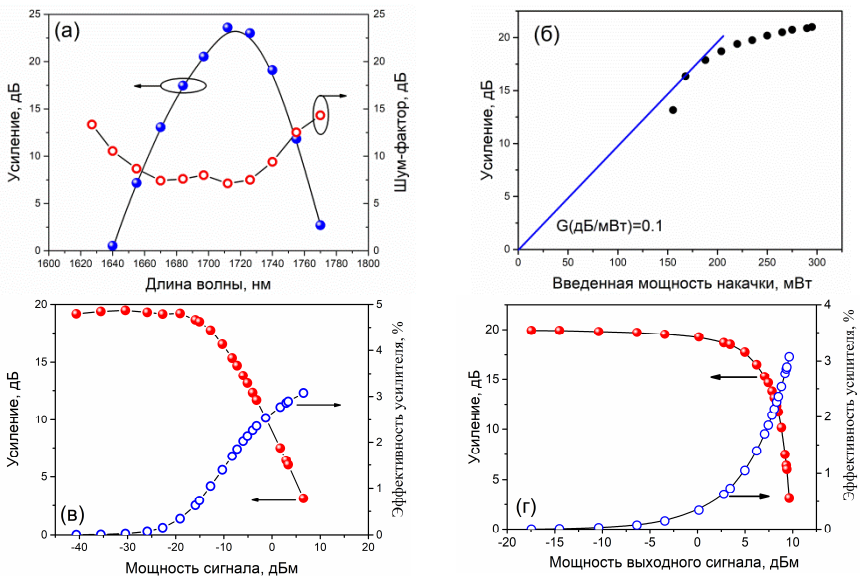


Рис. 14 Параметры висмутового усилителя: (а) спектральные зависимости коэффициента и шум-фактора; (б) зависимость оптического усиления на длине волны 1700 нм от мощности накачки на 1550 нм; (в, г) зависимость оптического усиления на длине волны 1680 нм и эффективности преобразования накачки в сигнал от мощности входного и выходного сигнала

В пункте 4.4 изложены результаты, касающиеся детального изучения усилительных характеристик висмутовых световодов в спектральной области 1.7 мкм. На Рис. 14(а) представлены спектральные зависимости коэффициента усиления и шум-фактора усилителя. Данные зависимости были получены при суммарной мощности накачки 300 мВт. Мощность входного сигнала была около -20 дБм. В этом случае усилитель работал в режиме малого сигнала. Видно, что максимальное усиление составляет 23 дБ на длине волны 1710 нм. Ширина спектра усиления по уровню 3 дБ равна 40 нм. Асимметричная форма спектра в длинноволновой области обусловлена вносимыми потерями

спектрально-селективным волоконным разветвителем, используемым для ввода/вывода излучений накачки и сигнала. Минимальный показатель шум-фактора составляет около 7 дБ в спектральном диапазоне 1670–1730 нм. На Рис. 14(б) показана зависимость оптического усиления от входной мощности накачки на длине волны 1550 нм. Максимальный коэффициент усиления достигал 0.1 дБ/мВт. Характеристики насыщения усилителя при накачке 300 мВт показаны на Рис. 14(в,г). Величины мощностей входного и выходного сигналов, при которых усилитель переходит в режим насыщения, составляют –13 и +5 дБм соответственно. В данном пункте приводится сравнение параметров висмутового усилителя с существующими аналогами, а именно с тулиевыми волоконными усилителями.

Глава V посвящена рассмотрению основных характеристик разработанной активной среды с полосой усиления более 200 нм на основе волоконного световода, солегирированного висмутом и эрбием.

В пункте 5.1 приведены результаты поискового исследования стеклянной матрицы, легированной висмутом и эрбием, для получения широкой полосы усиления. Исходя из полученных экспериментальных данных, показано, что использование фосфорогермано-силикатной стеклянной матрицы не позволяет получить широкую полосу усиления, несмотря на наличие широкополосной люминесценции. Установлено, что наиболее подходящей для этой цели является применение световодов с сердцевиной из кварцевого стекла с высоким содержанием оксида германия ≈ 50 мол.%. В этом случае наблюдается увеличение ширины полосы люминесценции более чем на 70 нм, по сравнению с аналогичной шириной полосы для световода, легированного только висмутом. В результате суммарная ширина полосы люминесценции световода с эрбием и висмутом превышает 200 нм. Измерения времени жизни люминесценции ВАЦ-Ge (≈ 500 мкс) и Er (≈ 5 –7 мс) показывали, что передача энергии между Er^{3+} и ВАЦ-Ge в исследуемых волокнах пренебрежимо мала, то есть ионы Er^{3+} и ВАЦ-Ge работают независимо. В этом случае ионы Er^{3+} в результате перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ обеспечивают усиление в коротковолновой области (1500–1620 нм), а ВАЦ-Ge ($E_2 \rightarrow E_1$) – в длинноволновой области (1620–1780 нм).

Была изготовлена и исследована серия волоконных высокогерманатных световодов с различным соотношением Вi и Er (Табл. 1). Концентрации висмута и эрбия в сердцевине световода были достаточно низкими. Причина низкой концентрации висмута была связана достижением максимальной эффективности в полосе усиления ВАЦ. Низкий уровень ионов эрбия в световоде был обусловлен двумя причинами: предотвращением

концентрационного тушения люминесценции и достижением оптического усиления, близкого по величине к усилению висмутовых активных центров.

Табл. 1. Параметры световодов с сердцевиной из высокогерманатного стекла, солегированного Вi и Er

Световод	Vi, ppm	$\alpha_{1650\text{нм}}$ дБ/м	Er, ppm
#1	140	1.6	15
#2	150	1.4	100
#3	150	0.85	1500

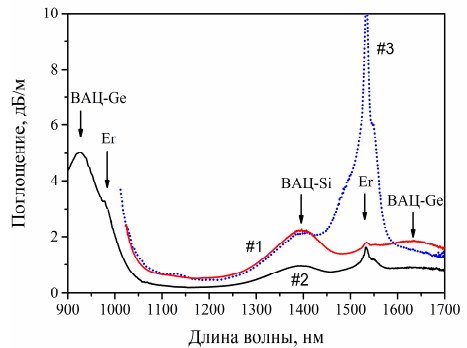


Рис. 15 Спектры поглощения световодов, содержащих Вi и Er.

Последнее условие было важным для получения широкой полосы оптического усиления без возникновения паразитной лазерной генерации в области усиления эрбия. На Рис. 15 представлены спектры поглощения исследованных световодов. В измеренных спектрах наблюдаются полосы поглощения, которые относятся к ВАЦ-Ge и ВАЦ-Si. Кроме того, можно отчетливо наблюдать более узкую полосу поглощения в области длины волны 1530 нм, относящуюся к ионам Er^{3+} . Одним из преимуществ использования таких световодов является то, что этом случае оба активных центра (Er и ВАЦ-Ge) можно эффективно возбуждать, используя излучение на одной длине волны в области 1400–1500 нм.

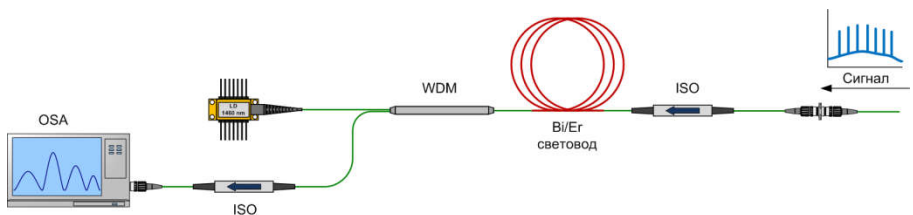


Рис. 16 Схема волоконного оптического усилителя на эрбий-висмутовом (активном) световоде. WDM – спектрально-селективный разветвитель, LD – лазерный диод; OSA – оптический спектроанализатор, ISO – оптический изолятор.

Используя разработанный световод, был реализован оптический усилитель, схема которого приведена на Рис. 16 (пункт 5.3). Для ввода/вывода излучения сигнала и накачки использовался спектрально-селективный разветвитель (WDM). На входе и выходе усилителя размещались оптические изоляторы (ISO) для подавления нежелательной лазерной генерации. В

качестве источника накачки использовался коммерчески доступный лазерный диод, излучающий на длине волны 1460 нм с выходной мощностью 350 мВт. Для измерения спектра оптического усилителя использовался самостоятельно изготовленный источник на основе висмутового и эрбиевого суперлюминесцентных источников, который обладал широким спектром излучения в диапазоне от 1500 до 1800 нм.

На Рис. 17 приведены спектральные зависимости коэффициента оптического усиления и шум-фактора висмутового усилителя. Видно, что максимум оптического усиления ≈ 40 дБ находится в области 1535 нм (в области усиления Er^{3+}). Необходимо отметить, что оптическое усиление около 15 дБ возникает в достаточно широкой спектральной области 1515–1775 нм (≈ 260 нм). Коэффициенты усиления в области длин волн 1550 и 1700 нм составляют 0.08 и 0.03 дБ/мВт соответственно. Для сравнения на графике изображен спектр усиления световода, легированного только висмутом. Сравнительный анализ полученных спектров показывает, что при введении Er происходит снижение усиления в области длин волн 1650–1750 нм. Это объясняется процессами поглощения ионов Er, находящихся в возбужденном состоянии (ESA – excited state absorption), что подтверждается экспериментальными данными (Рис. 17, вставка). Шум-фактор такого усилителя составляет 7–10 дБ.

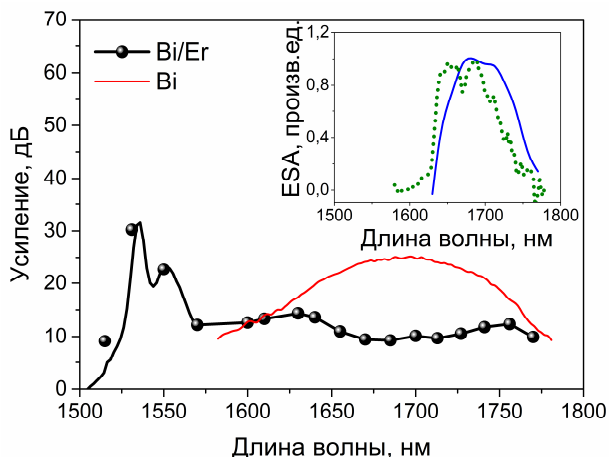


Рис. 17 Спектр оптического (net gain) усиления (шарики) и шум-фактора (ромбы) Bi/Er волоконного усилителя. Для сравнения сплошной линией показан спектр усиления световода, легированного только висмутом. На вставке изображены спектры ESA, принадлежащие эрбию, полученные в данной работе (сплошная линия) и в работе [18] (штриховая линия).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В результате проведенных исследований были получены следующие основные результаты:

1. Обнаружено и исследовано явление фотопроявления, возникающее в световодах с сердцевиной из $50\text{GeO}_2\text{--}50\text{SiO}_2$ стекла, легированного висмутом (от 10^{-3} до $30 \cdot 10^{-3}$ вес.%), при облучении лазерным излучением УФ, видимого и ИК диапазона. Получены динамические и спектральные зависимости изменения интенсивностей полос поглощения и люминесценции для висмутовых активных центров в процессе лазерного облучения. Показано, что процесс фотопроявления обусловлен фотообесцвечиванием висмутовых активных центров. Проведен детальный анализ особенностей процесса фотообесцвечивания висмутовых активных центров, на основе которого предложен механизм данного явления, заключающийся в модификации локальной структуры активного центра в результате фотоионизации кислородно-дефицитного дефекта.
2. Установлено, что фотоиндуцированное обесцвечивание висмутовых активных центров, ассоциированных с германием, является спонтанно необратимым процессом. Обнаружен процесс восстановления активных центров, который инициируется при нагреве облученных световодов при температуре выше $200\text{ }^\circ\text{C}$. Проведены детальные исследования процесса восстановления, определены оптимальные условия нагрева для полного восстановления фотообесцвеченных висмутовых активных центров. Показана возможность периодического «стирания» (фотообесцвечивания) и «наведения» (восстановления) активных центров в висмутовых световодах.
3. Установлено, что в отличие от оксидов фосфора и алюминия введение в кварцевое стекло оксида германия в небольших количествах (менее 10 мол.%) не оказывает существенного влияния на спектрально-люминесцентные характеристики висмутовых активных центров, ассоциированных с кремнием, формирующихся в получаемых световодах. В результате на основе световода с сердцевиной из германосиликатного стекла (с содержанием 5 мол.% GeO_2), легированного висмутом, создан непрерывный волоконный лазер, генерирующий ИК излучение на длине волны 1460 нм (на лазерном переходе висмутового центра, ассоциированного с кремнием), с рекордными параметрами при комнатной температуре: выходная мощность более 20 Вт; дифференциальная эффективность более 50%.

4. На основании комплексного исследования оптических и генерационных свойств легированных висмутом волоконных световодов с сердцевинной из стекла, содержащего количество оксида германия более 40 мол.%, показано, что такие одномодовые световоды обладают оптическим усилением в диапазоне длин волн от 1600 до 1800 нм и могут использоваться в качестве активной среды для лазеров и оптических усилителей в указанном спектральном диапазоне. Подтверждением этого стало применение таких световодов для получения лазерной генерации на длинах волн 1625, 1688, 1703, 1735 и 1775 нм с максимальной эффективностью более 30% и выходной мощностью более 2 Вт.
5. На основе легированного висмутом световода реализован волоконно-оптический усилитель для спектрального диапазона 1640–1770 нм. Разработанный висмутовый волоконный усилитель, накачиваемый излучением лазерных диодов с длиной волны 1550 нм и мощностью 300 мВт, обладает следующими выходными характеристиками: коэффициент усиления на длине волны 1710 нм – 23 дБ, ширина полосы усиления по уровню 3 дБ – 40 нм, коэффициент усиления – 0.1 дБ/мВт и минимальный уровень шум-фактора – 7 дБ.
6. Предложен способ повышения количества висмутовых активных центров с полосой оптического усиления в спектральной области 1600–1800 нм в световодах с сердцевинной из висмутосодержащего ($(0.1-20) \cdot 10^{-3}$ вес.%) стекла с содержанием оксида германия около 50 мол.%, который заключается в нагреве до температур 550–600 °С (~ 25 °С/мин) и последующем медленном охлаждении (~ 1–5 °С/мин). Таким способом были реализованы световоды с повышенным (более чем на 100% относительно исходного количества для световодов с концентрацией висмута ≈ 0.01 вес.%) содержанием активных центров. Это позволило сократить длину резонаторов висмутовых волоконных лазеров более чем на 50% без существенного изменения их эффективности. В результате создан волоконный лазер, генерирующий излучение на длине волны ≈ 1700 нм, с длиной резонатора 8.5 м и дифференциальной эффективностью 18%.
7. Разработан висмут-эрбиевый световод, на основе которого реализован широкополосный волоконно-оптический усилитель, обладающий коэффициентом усиления не менее 10 дБ и шум-фактором $\approx 7-10$ дБ в области длин волн от 1515 до 1775 нм (ширина полосы более 250 нм), при накачке лазерным диодом с длиной волны 1460 нм и выходной мощностью 350 мВт.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Melkumov M. A., Riumkin K. E., Shubin A. V., and Dianov E. M., Bismuth-doped optical fibers and fiber lasers for a spectral region of 1600–1800 nm // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39. – Issue 24. – PP. 6927–6930.
- A2. **Фирстов С. В.**, Рюмки К. Е., Хопин В. Ф., Алышев С. В., Фирстова Е. Г., Мелькумов М. А., Гурьянов А. Н., Дианов Е. М., Антистоксова люминесценция алюмо- и фосфоросиликатных световодов, легированных висмутом, при двухступенчатом ИК возбуждении// *Квантовая Электроника*. – 2016. –Т. 46. – № 7. – С. 612–616.
- A3. **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 Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2018. – vol. 20 – issue 5. – P. 0902415 [Available electronic version on <https://ieeexplore.ieee.org/document/8279401>] DOI: 10.1109/JSTQE.2018.2801461
- A4. **Firstov S.**, Alyshev S., Khopin V., Melkumov M., Guryanov A., Dianov E. Photobleaching effect in bismuth-doped germanosilicate fibers // *Optics Express*. –2015. – Vol. 23. – Issue 15. – PP. 19226–33.
- A5. **Firstov S. V.**, Firstova E. G., Alyshev S. V., Khopin V. F., Riumkin K. E., Melkumov M. A., Guryanov A. N., Dianov E. M., Recovery of IR luminescence in photobleached bismuth-doped fibers by thermal annealing // *Laser Physics*. – 2016. – Vol. 26. – P. 084007.
- A6. **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Firstova E. G., Melkumov M. A., Khagai A. M., Khopin V. F., Guryanov A. N., Dianov E. M., Dependence of the photobleaching on laser radiation wavelength in bismuth-doped germanosilicate fibers // *J. Luminescence*. – 2017. – Vol. 182. – PP. 87–90.
- A7. **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Kharakhordin A. V., Riumkin K. E., and Dianov E. M., Laser-induced bleaching and thermo-stimulated recovery of luminescent centers in bismuth-doped optical fibers // *Optical Materials Express*. – 2017. – Vol. 7. – PP. 3422–3432.
- A8. **Firstov S. V.**, Khopin V. F., Alyshev S. V., Firstova E. G., Riumkin K. E., Melkumov M. A., Khagai A. M., Kashaykin P. F., Guryanov A. N., and Dianov E. M., Effect of gamma-irradiation on the optical properties of bismuth-doped germanosilicate fibers // *Optical Materials Express*. – 2016. – Vol. 6. – PP. 3303–3308.
- A9. **Фирстов С. В.**, Шубин А. В., Хопин В. Ф., Мелькумов М. А., Буфетов И. А., Медведков О. И., Гурьянов А. Н., Дианов Е. М., Лазер на германосиликатном волоконном световоде, легированном висмутом, с

выходной мощностью 20 Вт на длине волны 1460 нм// *Квантовая электроника*. – 2011. – Т. 41. – № 7. – С. 581–583.

- A10. Дианов Е. М., **Фирстов С. В.**, Алышев С. В., Рюмкин К. Е., Шубин А. В., Хопин В. Ф., Гурьянов А. Н., Медведков О. И., Мелькумов М. А., Новый висмутовый волоконный лазер, излучающий в диапазоне 1625 – 1775 нм // *Квантовая электроника*. – 2014. – Т. 44. – № 6. – С. 503–504.
- A11. **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Riumkin K. E., Melkumov M. A., Medvedkov O. I., Dianov E. M., Watt-level, continuous-wave bismuth-doped all-fiber laser operating at 1.7 μm // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40. – Issue 18. – P. 4360–4363.
- A12. **Фирстов С. В.**, Алышев С. В., Рюмкин К. Е., Хопин В. Ф., Мелькумов М. А., Гурьянов А. Н., Дианов Е. М., Висмутовый волоконно-оптический усилитель для спектральной области 1600 – 1800 нм // *Квантовая электроника*. – 2015. – Т. 45. – № 12. – С. 1083–1085.
- A13. **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Riumkin K. E., Khopin V. F., Guryanov A. N., Melkumov M. A. & Dianov E. M., A 23-dB bismuth-doped optical fiber amplifier for a 1700-nm band // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 28939.
- A14. **Фирстов С. В.**, Рюмкин К. Е., Хопин В. Ф., Алышев С. В., Мелькумов М. А., Гурьянов А. Н., Дианов Е. М., Висмутовый волоконный суперлюминесцентный источник ИК излучения для спектрального диапазона 1700 – 1750 нм // *Квантовая электроника*. – 2016. – Т. 46. – № 9. – С. 787–789.
- A15. Riumkin K. E., **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Khagai A. M., Melkumov M. A., Khopin V. F., Kharakhordin A. V., Guryanov A. N., Dianov E. M., Performance of 1.73 μm Superluminescent Source Based on Bismuth-Doped Fiber Under Various Temperature Conditions and γ -Irradiation // *J. Lightwave Technology*. – 2017. – Vol. 35. – Issue 19. – P. 4114 – 4119.
- A16. **Фирстов С. В.**, Хопин В. Ф., Харахордин А. В., Алышев С. В., Рюмкин К. Е., Мелькумов М. А., Хегай А. М., Кашайкин П. Ф., Гурьянов А. Н., Дианов Е. М., Радиационно-наведенное поглощение в германосиликатных световодах, легированных висмутом// *Квантовая электроника*. – 2017. – Т. 47. – № 12. – С. 1120–1124.
- A17. **Firstov S.**, Kharakhordin A., Alyshev S., Riumkin K., Firstova E., Melkumov M., Khopin V., Guryanov A., Dianov E., Formation of Laser-Active Centers in Bismuth-Doped High-Germania Silica Fibers by Thermal Treatment// *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26. – Issue 10. – P. 12363–12371.
- A18. **Firstov S. V.**, Riumkin K. E., Khagai A. M., Alyshev S. V., Melkumov M. A., Khopin V. F., Afanasiev F. V., Guryanov A. N. and Dianov E. M., Wideband bismuth- and erbium-codoped optical fiber amplifier for C + L + U-

telecommunication band // *Laser Physics Letters*. – 2017. – Vol. 14. – P. 110001

- A19. Дианов Е. М., Рюмкин К. Е., Хопин В. Ф., Алышев С. В., Мелькумов М. А., Гурьянов А. Н., **Фирстов С. В.**, Оптический усилитель с полосой более 200 нм на основе германосиликатного волоконного световода, легированного ионами висмута и эрбия // *Квантовая электроника*. – 2016. – Т. 46. – № 11. – С. 973–975.
- A20. Dianov E. M., **Firstov S. V.**, Khopin V. F., Alyshev S. V., Riumkin K. E., Gladyshev A. V., Melkumov M. A., Vechkanov N. N., Guryanov A. N., Bismuth-doped fibers and fiber lasers for a new spectral range of 1600-1800 nm // *in Proc. SPIE 9728, Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications, 97280U* (March 11, 2016); doi:10.1117/12.2217957.
- A21. Bufetov I. A., Melkumov M. A., Khopin V. F., **Firstov S. V.**, Shubin A. V., Medvedkov O. I., Guryanov A. N., Dianov E. M., Efficient bi-doped fiber lasers and amplifiers for the spectral region 1300-1500 nm// *in Proc. SPIE 7580, Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications, 758014* (17 February 2010); doi: 0.1117/12.840666.
- A22. **Фирстов С. В.**, Хопин В. Ф., Гурьянов А. Н., Дианов Е. М., Волоконный световод для усиления оптического излучения в спектральной области 1500 – 1800 нм, способ его изготовления и широкополосный волоконный усилитель // *Патент РФ № 2627547*, Приоритет от 16 августа 2016 года, дата регистрации 08 августа 2017 года.
- A23. **Фирстов С. В.**, Алышев С. В., Мелькумов М. А., Рюмкин К. Е., Шубин А. В., Дианов Е. М., Волоконные световоды, легированные висмутом, – новая активная среда для лазеров и усилителей ближнего ИК-диапазона // *Прикладная фотоника*. – 2014. – № 1. – С. 6–19.
- A24. **Firstov S. V.**, Riumkin K. E., Khopin V. F., Alyshev S. V., Firstova E. G., Melkumov M. A., Guryanov A. N., Dianov E. M., Luminescent properties of bismuth-doped alumino- and phosphosilicate fibers under two-step excitation // *in Proc. 24th Annual International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'16)*, Galway, Ireland September 12–16, 2016 LM-5-6 (Invited).
- A25. **Firstov S. V.**, Kharakhordin A. V., Alyshev S. V., Riumkin K. E., Melkumov M. A., Khopin V. F., Guryanov A. N., and Dianov E. M., Photo-Induced Erasing and Thermal Regeneration of Luminescent Centers in Bismuth-Doped Optical Fibers// *in Proc. Workshop on Specialty Optical Fibers and Their Applications*, 11-13 October 2017, Limassol, Cyprus, paper 7.
- A26. **Firstov S.**, Shubin A., Khopin V., Bufetov I., Guryanov A., and Dianov E., The 20 W CW fibre laser at 1460 nm based on Si-associated bismuth active centres in germanosilicate fibres// *in Proc. CLEO/Europe and EQEC 2011 Conference*

Digest, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper PDA_7.

- A27. Dianov E. M., **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Riumkin K. E., Shubin S. V., Medvedkov O. I., Melkumov M. A., Khopin V. F., Guryanov A. N., New Bismuth-doped fiber laser operating at 1625-1775 nm // *in Proc. European Conference on Optical Communication*, 21-25 Sept. 2014, Cannes, France, 6963868.
- A28. **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Melkumov M. A., and Dianov E. M., Bismuth-Doped Fiber Lasers and Optical Amplifiers For Extended Transmission Bands: The Nature of Bi-Related Laser-Active Centers// *in Proc. European Conference on Optical Communication*, 27 Sept.-1 Oct. 2015, Valencia, Spain, pp. 1-3.
- A29. **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Riumkin K. E., Melkumov M. A., and Dianov E. M., A Novel Bismuth-Doped Fiber Laser for CW Operation between 1625 and 1775 nm// *in Proc. Asia Communications and Photonics Conference*, 19–23 November 2015, Hong Kong, China, paper ASu3C.3
- A30. **Firstov S. V.**, Khopin V. F., Alyshev S. V., Riumkin K. E., Melkumov M. A., Guryanov A. N., Dianov E. M., Bismuth-doped Optical Fiber Amplifier and Watt-Level CW Laser for the Spectral Region 1600 – 1800 nm// *in Proc. Optical Fiber Communication Conference* (Optical Society of America, 2016), 20–22 March 2016, Anaheim, USA, paper M3D.6.
- A31. **Фирстов С. В.**, Дианов Е. М., Прогресс в области разработки висмутовых волоконных лазеров и усилителей для спектральной области 1600 – 1800 нм// *Труды Российского семинара по волоконным лазерам*, 05-09 сентября 2016, Новосибирск, Россия, С. 45-46 (приглашенный доклад).
- A32. Riumkin K., **Firstov S.**, Khopin V., Alyshev S., Melkumov M., Guryanov A., and Dianov E., Novel superluminescent bismuth-doped fiber source for the 1700 – 1750 nm range// *in Proc. European Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Europe-EQEC 2017)*, 25-29 June 2017, Munich (ICM), Germany, paper CJ-P.23.
- A33. **Firstov S.**, Riumkin K., Alyshev S., Khopin V., Melkumov M., Guryanov A., Dianov E., Temperature-dependent Characteristics of Bismuth-doped Fiber Amplifier Operating in A 1720-nm Band// *in Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics - Pacific Rim CLEO-PR 2017*, 31 July – 04 August 2017, Singapore, paper P3-073.
- A34. Алышев С. В., **Фирстов С. В.**, Мелькумов М. А., Дианов Е. М., Висмутовые волоконные лазеры с длиной волны генерации в диапазоне 1.625 – 1.775 мкм // *Фотон-экспресс*. – 2015. – № 6. – С. 85-86.
- A35. **Firstov S. V.**, Khopin V. F., Riumkin K. E., Alyshev S. V., Melkumov M. A., Guryanov A. N., Dianov E. M., Bi/Er Co-doped Fibers as an Active Medium for Optical Amplifiers for the C-, L- and U- Telecommunication Bands// *in Proc.*

European Conference on Optical Communication, 18-22 September 2016, Dusseldorf, Germany, W.4.P1.SC1.4.

- A36. **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Riumkin K. E., Firstova E. G., Melkumov M. A., Khopin V. F., Gur'yanov A. N., Dianov E. M., Bi/Er co-doped silica-based fiber with gain bandwidth over 200 nm// *in Proc. 7th EPS-QEOD Europhoton Conference*, 21-26 August 2016, Viena, Austria, paper FWG-4.1.
- A37. **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Riumkin K. E., Melkumov M. A. and Dianov E. M., Bismuth-doped fiber amplifiers for optical telecommunication beyond L-band// *in Proc. Optic 2016*, 03-05 December 2016, Taipei, Taiwan, paper 270878.
- A38. **Firstov S. V.**, Riumkin K. E., Alyshev S. V., Melkumov M. A. and Dianov E. M., Broadband optical amplifier for a wavelength region of 1515–1775 nm // *in Proc. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Los Angeles, CA, 19–23 March 2017, pp. 1-3.
- A39. Dianov E. M., **Firstov S. V.**, and Melkumov M. A., Bismuth-Doped Fiber Lasers Covering the Spectral Region 1150 - 1775 nm// *in Proc. of Frontiers in Optics*, 2015 OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper LTu2H.1.
- A40. Alyshev S. V., Dianov E. M., **Firstov S. V.**, Photobleaching Phenomenon in Bismuth-Doped Laser-Active Fibers// *in Proc. International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'15*, 07-11 September 2015, Faro, Portugal, paper OC-O-1.
- A41. **Firstov S. V.**, Alyshev S. V., Firstova E. G., Melkumov M. A., Hegay A. M., Khopin V. F., Guryanov A. N., Dianov E. M., Photobleaching in Bi-Doped Germanosilicate Fibers at Different Laser Irradiation Wavelengths// *in Proc. International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2016)*, 26 – 30 September 2016, Minsk, Belarus, paper LTuC6.
- A42. **Firstov S. V.**, Khopin V. F., Afanas'ev F. V., Khagai A. M., Alyshev S. V., Riumkin K. E., Vechkanov N. N., Abramov A. N., Melkumov M. A., Guryanov A. N., and Dianov E. M., Unsaturable Absorption in Various Bi-Doped Optical Fibers// *in Proc. Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS 2017)*, 21-27 July 2017, Kazan, Russia, [electronic version] http://www.lasphys.com/workshops/abstracts/files/2017/4f/f8/5b/1338b0765a28d8bc_ded63dde5d/abstract.pdf
- A43. **Firstov S. V.**, Khopin V. F., Alyshev S. V., Riumkin K. E., Melkumov M. A., Dianov E. M., The Effect of Bi Content on Radiation Resistance of Bismuth-Doped Germanosilicate Fibers // *in Proc. International Laser Physics Workshop LPHYS 2016*, 11-15 July, Yerevan, Armenia [electronic version] <http://www.lasphys.com/workshops/abstracts/files/2016/26/3c/687e8350591de33c34a91d9f8ccb/abstract.pdf>

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Mainman T. H., Optical and microwave optical experiments in Ruby // *Physical Review Letters*. – 1960. – Vol. 4. – № 11. – P. 564-566.
- 2 Snitzer E., Proposed Fiber Cavities for optical masers// *Journal of Applied Physics*. – 1961. – Vol. 32. – № 1. – P. 36.
- 3 Dianov E.M., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Umnikov A.A., Yashkov M.V., Guryanov A.N., CW bismuth fiber laser // *Quantum Electronics*.– 2005. – №35. – P.1083.
- 4 Razdobreev I., Bigot L., Pureur V., Bouwmans G., Douay M. Efficient all-fiber bismuth-doped laser // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – Vol. 90. – P.031103.
- 5 Kalita M. P., Yoo S., and Sahu J. Bismuth doped fiber laser and study of unsaturable loss and pump induced absorption in laser performance // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16. – Issue 25. – P.21032.
- 6 Bufetov I. A., Dianov E. M., Bi-doped fiber lasers// *Laser Physics Letters*. – 2009. – Vol. 6.– P. 487.
- 7 Bufetov I. A., Melkumov M. A., Firstov S. V., Riumkin K. E., Shubin A. V., Khopin V. F., Guryanov A. N., and Dianov E. M., Bi-doped optical fibers and fiber lasers // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 20 – Issue 5. – 0903815.
- 8 Dianov E. M., Bismuth-doped optical fibers: a challenging active medium for near-IR lasers and optical amplifiers// *Light: Science & Applications*. – 2012. – Vol. 1. – e12
- 9 Crotti C., Deloison F., Alahyane F., Aptel F., Kowalczyk L., Legeais J.-M., Peyrot D. A., Savoldelli M., Plamann K. Wavelength Optimization in Femtosecond Laser Corneal Surgery // *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* – 2013. – Vol. 54. – № 5. – P. 3340–3349.
- 10 Kawagoe H., Yamanaka M., Makita S., Yasuno Y., and Nishizawa N., Ultrahigh-resolution spectral domain optical coherence tomography in 1.7 um wavelength region// in *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (2016) (Optical Society of America, 2016)*, paper JW2A.140.
- 11 Li Z., Jung Y., Daniel J. M. O., Simakov N., Tokurakawa M., Shardlow P. C., Jain D., Sahu J. K., Heidt A. M., Clarkson W. A., Alam S. U., and Richardson D. J., Exploiting the short wavelength gain of silica-based thulium-doped fiber amplifiers// *Opt. Lett.* – 2016. – Vol. 41. – P. 2197–2200.
- 12 Дворецкий Д. А., Буфетов И. А., Вельмискин В. В., Зленко А. С., Хопин В. Ф., Семенов С. Л., Гурьянов А. Н., Денисов Л. К., Дианов Е. М.,

- Оптические свойства волоконных световодов на основе плавленого кварца, легированного висмутом, в диапазоне температур 300 — 1500 К// Квантовая электроника. – Т. 42. – №9. – С. 762–769.
- 13 Jain S., Duchez J. B., Mebrouk Y., Velazquez M. M. A. N., Mady F., Dussardier B., Benabdesselam M., and Sahu J. K., Thermally-stimulated emission analysis of bismuth-doped silica fibers// Opt. Mater. Express. – 2014. – Vol. 4. – No. 7. – P. 1361–1366.
- 14 Neustruev V. B., Colour centres in germanosilicate glass and optical fibres// J. Phys: Cond. Mat. – 1994. – Vol. 6. – No. 35. – P. 6901.
- 15 Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Shubin A.V., Semenov S.L., Velmiskin V.V., Levchenko A.E., Firstova E.G., and Dianov E.M. Optical gain and laser generation in bismuth-doped silica fibers free of other dopants // Optics Letters. – 2011. – Vol. 36. – Issue 2. – P. 166-168.
- 16 Brambilla G., Pruneri V., Enhanced photosensitivity in silicate optical fibers by thermal // Appl. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 90. – P. 111905.
- 17 Agnello S., Gamma ray induced processes of point defect conversion in silica// PhD Thesis, 2000 [electronic version] <http://hdl.handle.net/10068/319405>
- 18 Román J. E., Hempstead M., Ye C. and Nouh S., 1.7 μm excited state absorption measurement in erbium-doped glasses// Appl. Phys. Lett. – 1995. – Vol. 67. – P. 470.