

На правах рукописи



Вахрушев Александр Станиславович

ВИСМУТОВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ СО СЛОЖНЫМ  
ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Научный руководитель: **Фирстов Сергей Владимирович**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, и.о. заместителя руководителя по научной работе НЦВО РАН (ИОФ РАН)

Официальные оппоненты: **Смирнов Александр Михайлович**, доктор физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и криоэлектроники (Физический факультет), Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

**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» (Университет ИТМО)

Защита состоится 09 сентября 2024 года в 16 часов на заседании диссертационного совета 24.1.223.03 при ИОФ РАН по адресу: 119991 г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

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

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.223.03  
канд. физ.-мат. наук  
тел.: +7 (499) 503-8780



Осадчий Александр Валентинович

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Появление и бурное развитие онлайн-сервисов, стриминговых платформ с возможностью просмотра/трансляций с высоким разрешением (FullHD, 4K), использование “умных вещей”, “облачных” хранилищ и файлообменников, искусственного интеллекта, развертывание сетей нового поколения 5G и 6G, возведение новых центров обработки данных способствовали стремительному увеличению глобального информационного трафика, что в ближайшем будущем приведет к информационному “коллапсу” без модернизации телекоммуникационных систем, направленной на увеличение их пропускной способности. Одним из решений данной проблемы является задействование новых телекоммуникационных диапазонов для расширения частотной полосы, используемой для передачи данных. В этом отношении особую актуальность приобрела научная задача по разработке активных сред для построения волоконно-оптических усилителей для ранее недоступных областей длин волн.

Поисковые исследования в области разработки новых типов активных световодов привели к тому, что в 2005 году [1, 2] были разработаны волоконные световоды, легированные висмутом, способные усиливать и генерировать оптическое излучение в области длин волн 1150 – 1220 нм. Интенсивный прогресс в данной области привел к появлению семейства оптических усилителей на основе висмутовых световодов (ВС), работающих в области длин волн 1260 – 1460 нм [3], что привлекло разработчиков ведущих мировых компаний как Huawei Tech., Nokia Bell Labs, Accelink, SiFotonics [4]. В настоящее время появились коммерческие висмутовые усилители для О-диапазона (1260 – 1360 нм) (OFS Furukawa) [5].

Несмотря на это, потенциальные возможности ВС до сих пор не известны, что обусловлено их особенностями, проявляющиеся в виде недостаточно изученной физической природы висмутовых активных центров (ВАЦ) и процессов их формирования в стеклообразных материалах [6].

Известно, что оптические свойства ВАЦ и иных форм висмутовых центров, которые могут образовываться в стекле, в сильной степени зависят от структуры и химического состава используемой стеклянной матрицы, а также общей концентрации висмута [7]. До настоящего времени изучение ВС преимущественно было сосредоточено на исследовании стандартных дизайнов, т.е. световодов с равномерным распределением легирующих активных добавок (Vi) и неактивных примесей, используемых для формирования ступенчатого профиля показателя преломления в сердцевине световода, где изучение вышеупомянутых особенностей является крайне затруднительным. В результате к началу исследований в рамках данной диссертационной работы был накоплен ряд важных нерешенных научных проблем, касающихся особенностей формирования ВАЦ (коэффициент конверсии, предельные концентрации и др.) и отсутствия знаний о их свойствах в образцах с модифицированной приграничной областью и с неравномерным радиальным распределением легирующих добавок (сложным профилем легирования), особенно на границе сердцевина-оболочка, и другие.

### **Цели и задачи работы**

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

Для достижения целей диссертационной работы решались следующие **научные задачи:**

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

#### **Научная новизна работы**

- Разработаны висмутовые волоконные световоды оригинального дизайна с различным распределением легирующих (активной и неактивной) добавок, обладающие улучшенными свойствами для получения лазеров с рекордной (среди висмутовых волоконных лазеров) эффективностью и широкополосных оптических усилителей.

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

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

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

установить механизм ограничения их выходной мощности и условия его возникновения.

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

#### **Методология и методы исследования**

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

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Коэффициент конверсии ионов  $V_i$  в висмутовые активные центры, ассоциированные с атомами  $Si_i$ , в германосиликатных световодах (G-дизайна) с кольцевым и центральным легированием составляет 10-35% и

зависит от химического состава стеклянной матрицы и общей концентрации висмута.

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

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

#### **Личный вклад диссертанта**

Диссертация является результатом многолетних исследований автора, которые включали экспериментальное исследование, систематизацию, анализ и интерпретацию полученных данных. Все измерения выполнялись лично

диссертантом или при его непосредственном участии. Кроме того, автором данной работы самостоятельно проводилась сборка оптических схем лазеров и усилителей в различных конфигурациях. Планирование экспериментов и анализ полученных результатов проводились совместно с научным руководителем и сотрудниками лаборатории волоконных лазеров и усилителей ИЦВО РАН (ИОФ РАН). Численный анализ и построение моделей процессов осуществлялось в тесном взаимодействии с с.н.с. ИЦВО РАН С.В. Алышевым. Написание статей, ставших основой данной диссертационной работы, выполнялось в тесном сотрудничестве с сотрудниками лаборатории. Получение висмутовых заготовок и вытяжка из них световодов осуществлялись в ИХВВ РАН.

### **Содержание диссертации соответствует паспорту специальности**

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки), в частности, следующим пунктам:

- п. 2 – Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности.
- п. 4 – Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ.
- п. 6 – Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

### **Апробация работы**

Результаты исследований докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: г. Москва, Прохоровские недели 2022, 18 – 20 октября 2022 года; г. Санкт-Петербург, International Conference on Laser Optics (ICLO), 20 – 24 июня 2022 года; г. Пермь ВКВО-2023, октябрь 2023 года,

а также представлялись на семинарах НЦВО РАН и ИОФ РАН в виде устных докладов.

### **Публикации**

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

### **Структура и объем работы**

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

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертации, научная новизна, защищаемые положения, теоретическая и практическая значимость работы, приведены сведения о личном вкладе диссертанта, апробации работы и публикациях автора, излагается структура диссертации и благодарности.

В **первой главе** представлен обзор ранее проведенных исследований в области изготовления ВС, включая описание влияния особенностей технологического процесса на их оптические свойства. Рассмотрены основные результаты по получению оптического усиления и лазерной генерации на переходах различных типов ВАЦ, опубликованных в работах иных авторов до начала выполнения исследований в рамках данной диссертации.

**Вторая глава** посвящена описанию технологии изготовления (MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) – модифицированное химическое осаждение из газовой фазы) ВС, которые являлись объектами исследования в данной диссертации. Также приведено описание экспериментальных установок и изложены основные методы исследования, примененные в ходе выполнения работы.

**Третья глава** посвящена изучению вопросов, касающихся влияния заданного радиального распределения висмута (Ві) и неактивных примесей, определяющих профиль показателя преломления (ППП) световода. Основное внимание в данном разделе сфокусировано на исследовании свойств световодов G-дизайна (рисунок 1 (а)), имеющих сердцевину с центральной и периферийной областями, различающимися химическим составом стекла, в частности, различным содержанием  $\text{GeO}_2$ , что хорошо видно на фотографии поперечного сечения световода (рисунок 1 (б)). Установлено, что в результате диффузии  $\text{GeO}_2$  в процессе вытяжки ВС ППП видоизменялся, становясь квазиградиентным (рисунок 1 (в)). Исследуемые образцы различались радиальным распределением концентрации Ві (образец А с кольцевым легированием; образец Б с равномерным легированием всей сердцевины; образец В с легированной центральной областью), которая во всех образцах не превышала примерно  $1,6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (рисунок 1 (г)). Для изучения влияния высоких концентраций висмута на эффективность формирования ВАЦ также изготавливался образец Б'' с увеличенной примерно вдвое концентрацией Ві по сравнению с образцом Б. Из-за особенностей технологического процесса введения Ві и его физико-химических свойств, распределение ионов висмута в центральной и периферийной областях даже в образце Б было не совсем равномерным, что, по-видимому, связано с испарением ионов висмута и/или процессом его диффузии. Как ранее было отмечено, введение висмута в стекло приводит к формированию не только ВАЦ, но и неактивных форм, приводящих к появлению дополнительных оптических потерь, величина которых в отличие от активного поглощения практически не изменяется даже при вводе в ВС излучения высокой мощности (так называемые ненасыщаемые потери). Получение экспериментальных данных о величине активного поглощения и ненасыщаемых потерь в исследуемых образцах осуществлялось с помощью абсорбционной спектроскопии насыщения, используя также, как и для поглощения слабого сигнала, метод облома.

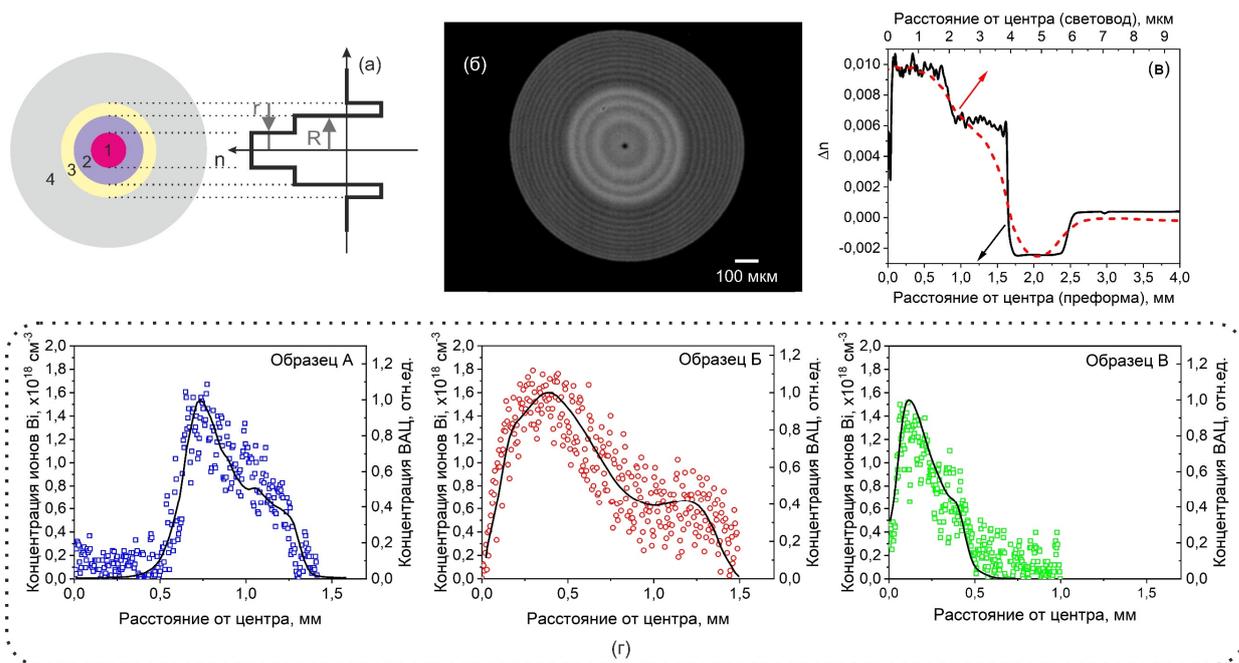


Рисунок 1 – Дизайн исследуемых ВС: а) ВС G-дизайна; б) фотография сердцевин в преформе (центральная область с более высоким содержанием  $\text{GeO}_2$  ярче, чем периферийная; черный цвет соответствует оболочке из  $\text{SiO}_2$  стекла); в) экспериментально полученный ППП заготовки (сплошная линия) и ВС (пунктирная линия); г) радиальные распределения концентрации ионов  $\text{Bi}$  (символы) и относительного содержания ВАЦ (сплошная линия) в образцах А, Б и В.

Типичная зависимость насыщения активного поглощения от мощности вводимого излучения на длине волны 1310 нм представлена на рисунке 2 (для образца Б). Уровень ненасыщаемых потерь всех исследуемых световодов был достаточно низким:  $\approx 4\%$  для образца А и  $< 2\%$  для образцов Б и В, что соответствует лучшим ВС. Помимо зависимостей насыщения поглощения, в работе получены зависимости насыщения интенсивности ИК люминесценции ВС (рисунок 2, образец Б). Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволило определить максимальную концентрацию ВАЦ, которая составила от  $1,5 \times 10^{17}$  до  $5,2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  в зависимости от исследуемого образца. Используя радиальные распределения концентраций  $\text{Bi}$  и ВАЦ, выполнена оценка эффективности формирования ВАЦ (коэффициент конверсии), выраженной в виде определения доли атомов висмута, принимавших участие в формировании ВАЦ, по отношению к общему количеству атомов  $\text{Bi}$  в стекле.

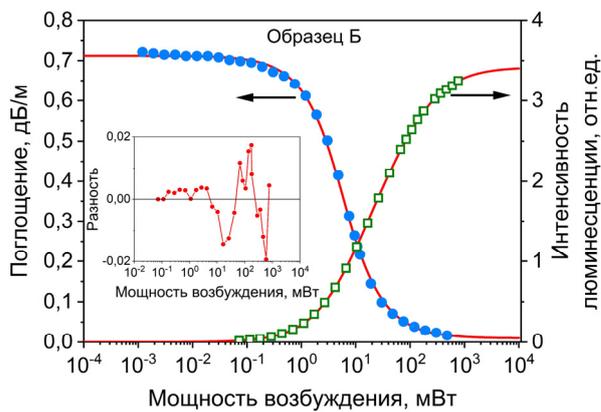


Рисунок 2 – Зависимость величины поглощения (кружки) и интенсивности люминесценции (квадраты) на 1430 нм от мощности на 1310 нм.

Полученные значения коэффициента конверсии представлены на рисунке 3 (а). Оказалось, что среднее значение коэффициента конверсии может варьироваться от 10 до 35 %. Анализ полученных данных позволил сделать вывод о том, что помимо концентрации атомов висмута существенную роль в наблюдаемых изменениях

коэффициента конверсии  $Vi \rightarrow VAЦ$  оказывает концентрация и радиальное распределение  $GeO_2$  в сердцевине ВС. На основе разработанных ВС созданы непрерывные одномодовые волоконные лазеры с накачкой в сердцевину активного световода, обладающие рекордными значениями дифференциальной эффективности  $\approx 80\%$  (рисунок 3 (б)).

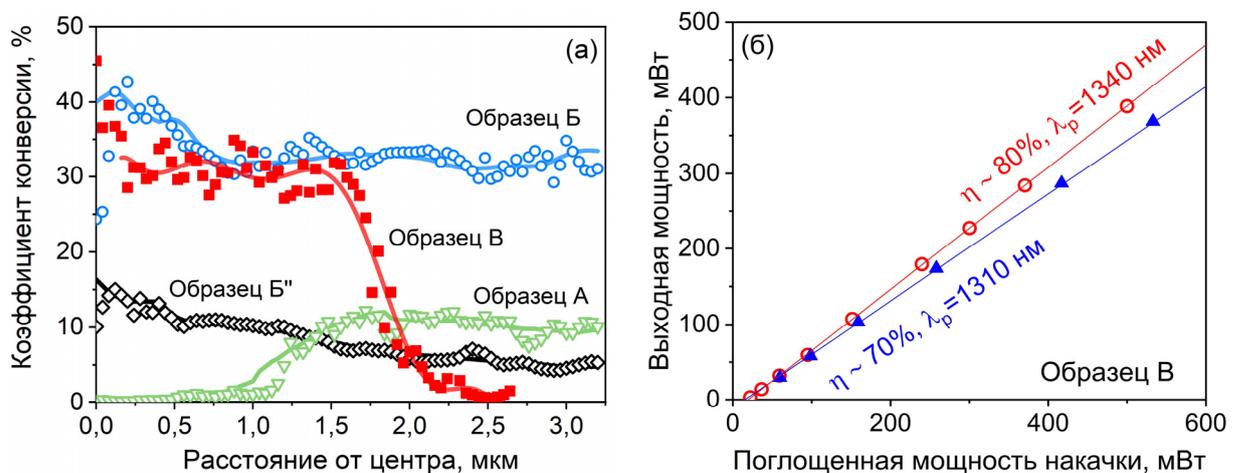


Рисунок 3 – а) Радиальное распределение коэффициента конверсии  $Vi \rightarrow VAЦ$  в изучаемых ВС (образцы А-В и Б''); б) зависимость выходной мощности висмутового лазера на 1460 нм, от поглощенной мощности накачки на  $\lambda_p = 1310$  и 1340 нм.

**Четвертая глава** посвящена подробному изучению абсорбционных, спектрально-люминесцентных, усилительных свойств ВАЦ, формируемых в  $P_2O_5-SiO_2$  стекле сердцевины в световодах различного дизайна, включая образцы с ППП W-дизайна и с пьедесталом. Из экспериментального изучения оптических свойств таких материалов, было показано, что использование W-

дизайна применительно к световодам с сердцевиной из фосфоросиликатного стекла, легированного  $\text{Vt}$ , позволяет получить активную среду с плоским контуром оптического усиления, ширина которого составила  $>120$  нм (на полувысоте) за счет взаимного перекрытия полос усиления ВАЦ, ассоциированных с атомами Si (ВАЦ-Si) и P (ВАЦ-P).

В данной главе также приводятся результаты подробного исследования особенностей возникновения и протекания процессов, ответственных за преобразования ВАЦ в неактивное состояние при воздействии лазерного излучения (фоточувствительные свойства ВАЦ). В ходе экспериментов наблюдался процесс фотообесцвечивания ВАЦ, который проявлялся в виде снижения интенсивности люминесценции конкретного типа ВАЦ (1430 нм – для ВАЦ-Si и 1330 нм – для ВАЦ-P) при воздействии лазерного излучения ИК (1240 нм в полосу поглощения ВАЦ) и видимого диапазона (532 нм мимо явных полос поглощения ВАЦ). Установлено, что данный процесс является температурно-зависимым: его скорость существенно возрастает с ростом температуры от 300 до 600 °С. Временная эволюция количества ВАЦ-P (выраженных в нормированной интенсивности люминесценции) в нагретых до разных температур ВС, подвергшихся воздействию излучением на длинах волн 532 и 1240 нм, показана на рисунке 4 (а).

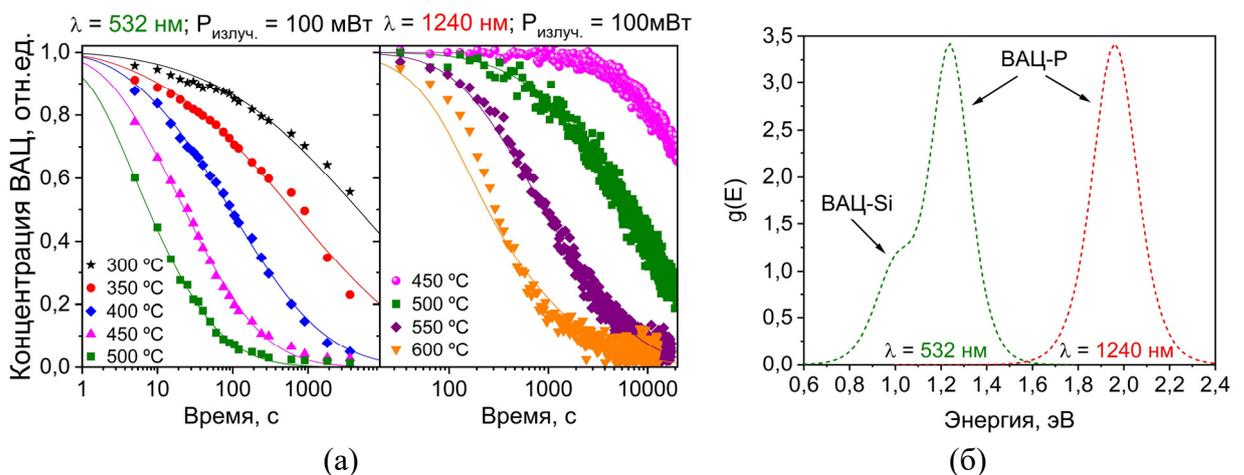


Рисунок 4 – Фотообесцвечивание ВАЦ: а) временные зависимости изменения относительной концентрации ВАЦ-P в световоде W-дизайна, подвергнутом облучению излучением  $\lambda = 532$  и 1240 нм при разных температурах (символы – эксперимент; линии – расчет); б) распределение энергии активации фотопроцессов для ВАЦ-Si и ВАЦ-P.

Видно, что при 500 °С за  $\approx 1000$  с происходит почти полное разрушение всех ВАЦ-Р, индуцированное излучением на  $\lambda = 532$  нм, тогда как при  $T = 300$  °С их содержание изменяется всего на 25–30%. Для регистрации фотообесцвечивания ВАЦ-Р при воздействии ИК излучением требовалось значительно большее время, как видно из рисунка 4(а), что обусловлено сравнительно медленной скоростью протекающей реакции, чем при  $\lambda = 532$  нм. В этом случае деструкция всех ВАЦ происходила в течение  $\approx 2$  часов при  $T = 600$  °С. Используя экспериментальные данные и построенную модель процесса с применением метода демаркационной энергии, были выявлены характерные энергии активации 1,24 и 1,98 эВ (для ВАЦ-Р) и их распределения (рисунок 4 (б)). Таким образом, установлено существование как минимум двух процессов, приводящих к разрушению ВАЦ-Р, характеризующихся различными энергиями активации. Сравнительный анализ скоростей протекания процессов фотообесцвечивания ВАЦ-Р в ВС W-дизайна и стандартного типа световода (со ступенчатым ППП) показал, что в первом случае такой процесс протекает заметно быстрее.

**Пятая глава** посвящена изучению оптических свойств активных сред на основе разработанных ВС со сложным профилем легирования для получения усиления и генерации оптического излучения с использованием многомодового излучения от полупроводниковых лазерных диодов накачки (ЛД). Показано, что такие материалы обладают интенсивными полосами поглощения в ближнем ИК-диапазоне, которые хорошо согласуются со спектром излучения коммерчески доступных мощных многомодовых ЛД на длинах волн 793 и 808 нм. Это дало возможность в комбинации с эффективными многоканальными системами ввода излучения (объединитель накачки) значительным образом упростить конструкцию висмутовых волоконных лазеров (рисунок 5 (а)) по сравнению с аналогами, накачиваемыми одномодовыми лазерами. Подход с использованием многомодовых ЛД подразумевает получение оптического усиления и лазерной генерации в активной среде, работающей по трехуровневой схеме

(рисунок 5 (б)), т.е. с задействованием вышерасположенного, чем верхний лазерный, уровня. Полученные в данной работе высокие значения оптического усиления  $>25\text{--}30$  дБ в таких активных средах послужили поводом для выполнения серии лазерных экспериментов. В результате для обоих типов ВАЦ (ВАЦ-Si и ВАЦ-P), формирующихся в том числе и в световодах сложного дизайна (G- и W-дизайн), была успешно получена лазерная генерация в ближней ИК-области. Зависимости выходной мощности таких лазеров представлены на рисунке 5(в), дифференциальная эффективность которых составила 1–2% от введенной мощности накачки.

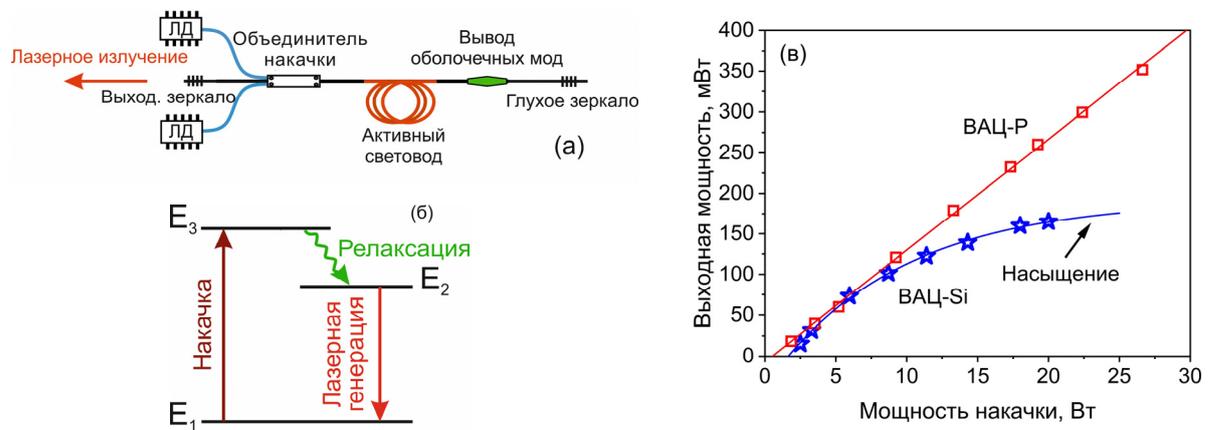


Рисунок 5 – Лазеры на ВС с накачкой многомодовыми ЛД. а) Типичная конфигурация лазера; б) диаграмма энергетических уровней ВАЦ и основных переходов; в) зависимость выходной мощности лазеров на основе  $\text{P}_2\text{O}_5\text{--SiO}_2$  (квадраты) и  $\text{GeO}_2\text{--SiO}_2$  (звезды) световодов, легированных  $\text{V}_i$ , от мощности накачки на 793 и 808 нм, соответственно.

Дальнейшие эксперименты были направлены на оптимизацию параметров активной среды (формы внутренней оболочки активного световода и соотношения размеров сердцевины/оболочки) для повышения эффективности работы таких лазеров, реализованных в разных конфигурациях резонатора. На основе ВС ( $L = 300$  м) с площадью поперечного квадратного сечения внутренней оболочки  $80 \times 80$  мкм<sup>2</sup> и диаметром сердцевины 11,5 мкм получена лазерная генерация с дифференциальной эффективностью  $\sim 5\%$  при низких мощностях накачки (рисунок 6). Установлено, что эффективность работы активной среды с ВАЦ-Si снижается с 5 до почти 1% при повышении мощности накачки на длине волны 808 нм,

что обусловлено эффектом насыщения в активной среде (рисунок 5 (в) и рисунок 6). Причина данного эффекта заключается в недостаточной заселенности метастабильного лазерного уровня  $E_2$  из-за продолжительного времени релаксации ВАЦ с возбужденного уровня  $E_3$ , что подтверждается

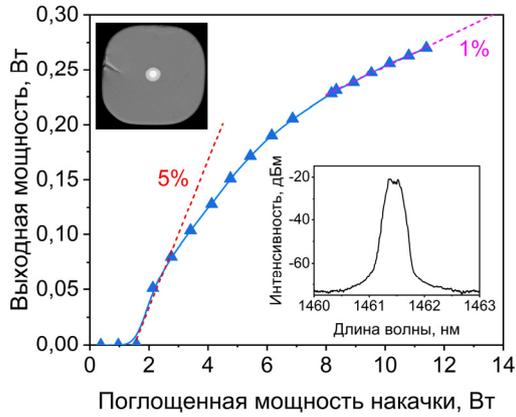


Рисунок 6 – Лазерная генерация на ВС с квадратной формой внутренней оболочки. Сечение висмутового световода (верхняя вставка). Зависимость выходной мощности от поглощенной мощности накачки. Спектр генерации (вставка снизу).

результатами численных расчетов. Показано, что при возрастании скорости (сокращении времени) релаксации ВАЦ эффект насыщения может быть частично (даже полностью) преодолен для времен релаксации  $< 5$  мкс (при прочих равных условиях). В экспериментах сокращение времени релаксации ВАЦ достигалось за счет вынужденного перехода  $E_3 \rightarrow E_2$  при использовании дополнительного лазерного излучения в диапазоне длин волн 1930 – 2040 нм (рисунок 7 (а)), что подтверждается получением

зависимостей выходной мощности близких к виду линейной функции.

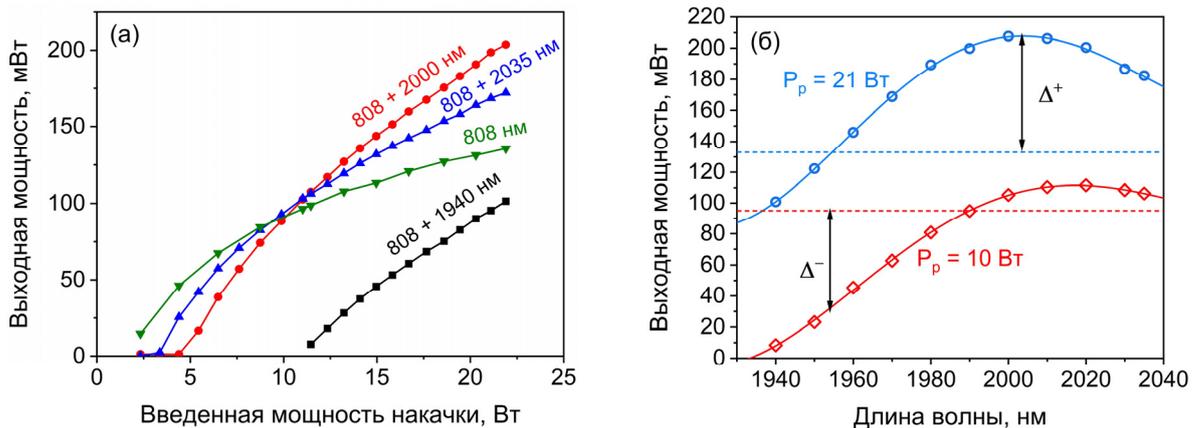


Рисунок 7 – Висмутовый лазер с накачкой многомодовым ЛД: а) зависимость выходной мощности лазера на  $\lambda = 1460$  нм от введенной мощности накачки на  $\lambda = 808$  нм (при использовании дополнительного излучения на разных длинах волн с мощностью  $\approx 2$  Вт); б) выходная мощность лазера в зависимости от длины волны дополнительного возбуждающего излучения. Пунктирная линия – уровень мощности висмутового лазера работающего в обычном режиме (только при накачке ЛД).

Кроме того, установлено, что выбор оптимальных длин волн излучения позволяет увеличить мощность  $\Delta^+$  выходного излучения из активной среды почти вдвое (рисунок 7 (б)). Однако существуют области длин волн, использование которых может приводить и к снижению  $\Delta^-$  выходной мощности устройств (рисунок 7(б)).

В **заключении** работы сформулированы основные выводы по результатам проведенных исследований.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1) Определен коэффициент конверсии ионов висмута в висмутовые активные центры ( $Bi \rightarrow VAЦ$ ), который составил от 10 до 35%, в волоконных световодах с сердцевиной из германосиликатного стекла, легированного висмутом, с различным радиальным распределением легирующих (активных и неактивных) добавок. Установлено, что помимо концентрации ионов висмута существенное влияние на коэффициент конверсии  $Bi \rightarrow VAЦ$  оказывает химический состав стекла сердцевины, а именно концентрация и распределение  $GeO_2$ . На основе висмутового световода с ограниченным (центральная область) легированием сердцевины реализован волоконный лазер на длине волны 1460 нм с рекордной (для висмутовых лазеров) дифференциальной эффективностью  $\approx 80\%$ .

2) Обнаружен эффект фотообесцвечивания  $VAЦ$  в световодах с сердцевиной из фосфоросиликатного стекла, легированного висмутом. Показано, что деградация  $VAЦ$  происходит при воздействии видимого и ИК лазерного излучения, а ее интенсивность растет с увеличением температуры до 300-600 °С. Определены средние значения (1,24-1,98 эВ) и распределения энергий активации процессов фотообесцвечивания  $VAЦ$ , ассоциированных с фосфором ( $VAЦ-P$ ). Экспериментально установлено, что скорость протекания процессов, приводящих к фотообесцвечиванию  $VAЦ-P$ , заметно выше для световода с W-дизайном по сравнению со стандартным световодом (со ступенчатым профилем показателя преломления).

3) Продемонстрирована принципиальная возможность получения оптического усиления и лазерной генерации в ближней ИК области на основе висмутовых германосиликатных световодов (G-дизайна), характеризующихся рекордно низким уровнем ненасыщаемого поглощения  $< 2\%$  от общего уровня вблизи основного пика поглощения ВАЦ-Si, с использованием многомодовой диодной накачки на 808 нм. В результате было показано, что висмутовые лазеры такого типа способны генерировать оптическое излучение в области длин волн 1400 – 1500 нм с максимальной эффективностью до 5% (при создании радиально-несимметричной формы внутренней оболочки).

4) Обнаружен эффект насыщения выходной мощности лазерной генерации на переходах ВАЦ-Si при возбуждении на длине волны 808 нм. Установлено, что основное ограничение роста выходной мощности вызвано медленной релаксацией ВАЦ-Si с вышерасположенного возбужденного уровня на метастабильный (лазерный) уровень. Продемонстрировано, что заселение лазерного уровня за счет вынужденных переходов ВАЦ-Si при использовании дополнительного лазерного излучения в диапазоне длин волн 2000 – 2040 нм способствует частичному преодолению насыщения, т.е. зависимости выходной мощности лазерной генерации становятся близки к виду линейной функции, а мощность выходного излучения возрастает почти вдвое.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Результаты исследований позволили выявить закономерности формирования ВАЦ, а также получить информацию о возможностях оптимизации дизайна световодов такого типа и их потенциальных возможностях с точки зрения практической направленности. Это создает предпосылки к поиску новых конструкций различного типа висмутовых световодов, обладающих заданными свойствами. В рамках данного исследования были обнаружены фотохимические процессы в стеклообразных материалах, которые характерны не только для изучаемого объекта исследования (висмутовые световоды), но и, вероятно, для всего класса

лазерно-активных материалов на основе стеклянных световодов. Дальнейшие исследования в этом направлении представляются крайне перспективными и многообещающими, поскольку известно, что фотохимические процессы (фотообесцвечивание, фотопотемнение и др.) могут оказывать влияние на стабильность и продолжительность работы волоконно-оптических устройств. Кроме того, в данной работе впервые реализованы оригинальные оптические устройства на основе висмутовых световодов с многомодовой диодной накачкой, что крайне перспективно с точки зрения продвижения в создании недорогих, компактных висмутовых волоконных лазеров и усилителей высокой мощности, работающих в ближней ИК-области. В целом, направление по разработке и изучению оптических свойств висмутовых световодов, является крайне актуальным, особенно с практической точки зрения, поскольку такие материалы играют ключевую роль в построении высокоскоростных систем связи нового поколения, в том числе 5G и 6G технологии, основанных на расширении спектральной полосы передачи данных. Данное направление активно развивается в мире, что подтверждается интересом, публикациями и созданием коммерческих продуктов со стороны ведущих научно-исследовательских институтов и компаний в области разработки инновационных решений и коммерческих систем для телекоммуникационной индустрии.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- 1 Impact of doping profile on the formation of laser-active centers in bismuth-doped  $\text{GeO}_2 - \text{SiO}_2$  glass fibers / S.V. Alyshev, **A.S. Vakhrushev**, A.M. Khagai [et al.] // *Photonics Research*. – 2024. – Vol. 12. – Issue 2 – P. 260-270.
- 2 Непрерывные висмутовые волоконные лазеры с многомодовой диодной накачкой / **А.С. Вахрушев**, С.В. Алышев, А.М. Хегай [и др.] // *Автометрия*. – 2023. – Т. 59. – №. 1. – С. 5-14.
- 3 Cladding-pumped bismuth-doped fiber amplifiers operating in O-, E-, and S-telecom bands / **A.S. Vakhrushev**, A.M. Khagai, S.V. Alyshev [et al.] // *Optics Letters*. – 2023. – Vol. 48. – Issue 6. – P. 1339-1342.

- 4 Висмутовый волоконный лазер с накачкой в оболочку световода, излучающий в области длин волн 1.3 – 1.4 мкм / **А.С. Вахрушев**, А.В. Харахордин, А.М. Хегай [и др.] // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – №. 8. – С. 681-684.
- 5 Cladding-pumped bismuth-doped fiber laser / S.V. Firstov, A.A. Umnikov, A.V. Kharakhordin, **A.S. Vakhrushev**, E.G. Firstova, S.V. Alyshev, A.M. Khagai, K.E. Riumkin, Y.Z. Ososkov, A.N. Guryanov, M.A. Melkumov // Optics Letters. – 2022. – Vol. 47. – Issue 4. – P. 778-781.
- 6 W-type and Graded-index bismuth-doped fibers for efficient lasers and amplifiers operating in E-band / **A.S. Vakhrushev**, A.A. Umnikov, A.S. Lobanov [et al.] // Optics Express. – 2022. – Vol. 30. – Issue 2. – P. 1490-1498.
- 7 Deterioration of Bismuth-Doped fiber lasers performance induced by blue and green laser light launched into cladding / S.V. Firstov, A.V. Kharakhordin, **A.S. Vakhrushev** [et al.] // Results in Physics. – 2022. – Vol. 34. – P. 105276.
- 8 Recent advances in Bi-doped silica-based optical fibers: A short review / A.M. Khagai, S.V. Alyshev, **A.S. Vakhrushev** [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids: X. – 2022. – P. 100126.
- 9 Double-Clad Bismuth-doped Fiber with a Rectangular Inner Cladding for Laser Application / **A.S. Vakhrushev**, A.A. Umnikov, S.V. Alyshev [et al.] // Photonics. – 2022. – Vol. 9. – Issue 11. – P. 788.
- 10 Output power saturation effect in cladding-pumped bismuth-doped fiber lasers / **A.S. Vakhrushev**, Y.Z. Ososkov, S.V. Alyshev [et al.] // Journal of Lightwave Technology. – 2022. – Vol. 41. – Issue 2. – P. 709-715.
- 11 Переходные процессы и перекрестные помехи в висмутовом оптическом усилителе для О-диапазона / С.В. Алышев, А.В. Харахордин, А.М. Хегай, Я.Ж. Ососков, **А.С. Вахрушев**, Е.Г. Фирстова, К.Е. Рюмкин, М.А. Мелькумов, А.С. Лобанов, А.Н. Гурьянов, С.В. Фирстов // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – №. 7. – С. 630-634.
- 12 Combined effect of thermal and laser treatment on the destruction of active centers in Bi-doped phosphosilicate fibers / A.V. Kharakhordin, S.V. Alyshev, K.E.

Riumkin, A.M. Khagai, **A.S. Vakhrushev**, E.G. Firstova, M.A. Melkumov, A.S. Lobanov, F.V. Afanasiev, A.N. Guryanov, S.V. Firstov // Optical Materials Express. – 2021. – Vol. 11. – Issue 4. – P. 1247-1258

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 CW bismuth fibre laser / E.M. Dianov, V.V. Dvoyrin, V.M. Mashinsky [et al.] // Quantum Electronics. – 2005. – Vol. 35. – Issue 12. – P. 1083.
- 2 Absorption, fluorescence and optical amplification in MCVD bismuth-doped silica glass optical fibres / V.V. Dvoyrin, V.M. Mashinsky, E.M. Dianov [et al.] // Europe Conference on Optical Communication, ECOC. – 2005. – Vol. 4. – P. 949-950.
- 3 30-GBaud DP 16-QAM transmission in the E-band enabled by bismuth-doped fiber amplifiers / A. Donodin, M. Tan, P. Hazarika [et al.] // Optics Letters. – 2022. – Vol. 47. – Issue 19. – P. 5152-5155.
- 4 High power BDF/EDF hybrid amplifier providing 27 dB gain over 90 nm in the E+ S band / F. Maes, M. Sharma, L. Wang, Z. Jiang // Optical Fiber Communication Conference. – 2022. – P. Th4C. 8
- 5 VIAVI Solutions: офиц. сайт. Сан-Хосе. URL: <https://www.viavisolutions.com/en-uk/products/map-o-band-optical-fiber-amplifier-mofa-c1> (дата обращения: 27.02.2024)
- 6 Дианов, Е.М. О природе Vi-центров в стекле, излучающих в ближней ИК области спектра / Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – № 4. – С. 283–285.
- 7 Optical spectroscopy of bismuth-doped pure silica fiber preform / I. Razdobreev, H. El Hamzaoui, V.Yu. Ivanov [et al.] // Optics Letters. – 2010. – Vol. 35. – Issue 9. – P. 1341-1343.