

На правах рукописи



Пластинин Евгений Александрович

**Волоконные световоды с сердцевиной на основе  
консолидированного нанопористого стекла, легированного  
висмутом, церием или диспрозием**

Специальность: 1.3.19. Лазерная физика

**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:**

**Вельмискин Владимир Владимирович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НЦВО РАН

**Официальные оппоненты:**

**Мешковский Игорь Касьянович**, доктор технических наук, ведущий профессор, директор научно-исследовательского центра световодной фотоники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

**Попов Сергей Михайлович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории волоконных световодов и элементов на их основе Фрязинского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

**Ведущая организация:**

Акционерное общество «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова» (АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»)

Защита диссертации состоится 9 сентября 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.223.03 при ИОФ РАН по адресу: 119991, 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 г.

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

Александр Валентинович Осадчий

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Драйвером развития волоконно-оптических систем связи стали успехи материаловедения, достигнутые в 60-70-ые годы XX века. В 1960-ых годах было показано, что основной причиной затухания оптического сигнала в матрице стекла является поглощение примесями переходных металлов [1]. Развитие газофазных методов осаждения в 1970-х годах позволило решить проблему высокой концентрации примесей переходных металлов в стёклах [2, 3]. С тех пор высокочистые стёкла (с долей примесей менее 1 ppb), получаемые газофазными методами, стали основой для промышленного получения световодов с низкими оптическими потерями. Эти методы имеют свои пределы применимости. Они разработаны для создания сверхчистых волоконных световодов для телекоммуникации и слаболегированных активных световодов. Однако, для повышения эффективности активных волоконных световодов требуется однородное введение больших концентраций легирующих добавок. При использовании в газофазных методах высоких концентраций активирующих допантов зачастую проявляются кластеризационные эффекты. Тем самым возникает необходимость получения оптически активных материалов с помощью привлечения и разработки новых методов производства.

Одним из новых подходов стало использование нанопористых стёкол (ПС). ПС представляют из себя стеклянный каркас, пронизанный порами с характерным размером от 1 до 100 нм. Современные технологии позволяют получать стеклянную пористую структуру хорошего оптического качества, которая может быть легирована веществом, модифицирующим оптические свойства материала, что особенно актуально для материалов, применяемых в волоконной оптике.

Для волоконной оптики данная технология обладает рядом преимуществ по сравнению с газофазными процессами получения волоконных световодов. Легирование ПС позволяет пространственно разнести ионы благодаря специфичной структуре каналов в материале. Такие пористые структуры важны для решения задач, требующих либо стабилизации определённого состояния иона, либо пространственного разделения ионов с целью подавить межионное взаимодействие. Эти задачи типичны как для случая легирования редкоземельными элементами (РЗЭ), так и переходными элементами.

Например, в последние 20 лет активно изучаются волоконные световоды, легированные  $V_i$  [4]. Они могут стать основой лазеров и усилителей в широком диапазоне длин волн, недоступном лазерам и усилителям на основе РЗЭ (Рисунок 1) [5].  $V_i$  может находиться в стекле в различных валентных состояниях. Использование технологии легирования ПС позволяет вводить  $V_i$  в нужной валентности [4].

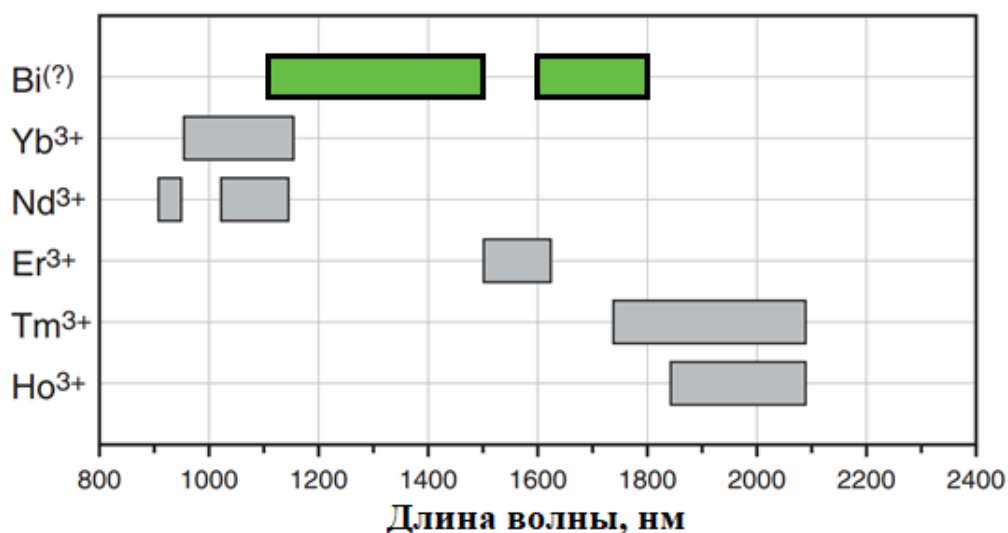


Рисунок 1 – Серые прямоугольники: рабочие диапазоны волоконных лазеров на РЗЭ. Зелёные прямоугольники: рабочие диапазоны лазеров на основе волоконных световодов, легированных Bi [5].

Другим примером стабилизации нужного состояния иона может стать Се. Стекло, легированное Се, является одним из лучших сцинтилляторов и используется для детектирования гамма- и рентгеновского излучений. При этом, важную роль играет короткоживущий (<20 нс) оптический излучательный переход иона  $\text{Ce}^{3+}$ . В то же время ион  $\text{Ce}^{4+}$  остаётся неактивным, а соотношение их концентраций определяет эффективность сцинтиллятора [6]. Подбор условий изготовления стекла методом пропитывания ПС может позволить повысить концентрацию ионов  $\text{Ce}^{3+}$ .

Примером пространственного разделения ионов может стать Ду для которого характерны ап-конверсионные процессы [7]. Материалы с Ду интересны с точки зрения получения источников лазерного излучения в видимом диапазоне. Однако, активно идущие процессы переноса энергии между ионами затрудняют получение лазерной генерации. ПС позволяют разделить в пространстве ионы Ду, подавив кластеризационные эффекты.

Перспективность данного подхода подтверждена работами других групп, опубликованным к началу данного исследования. Группа из Уханьской национальной лаборатории оптоэлектроники (г. Ухань, Китай) изготовила иттербиевый волоконный лазер с сердцевиной на основе легированного ПС [8]. Примером стабилизации ионного состояния может служить диссертация Гирсовой М.А. [9], в которой было показано, как различные условия термообработки ПС, легированного Bi, приводят к различной картине люминесценции.

Несмотря на достигнутые результаты, остаётся актуальным проведение дополнительных поисковых исследований в области использования ПС для создания легированных волоконных световодов. Во-первых, необходимо определить требования к составу ПС, подходящих для

изготовления волоконных световодов. Во-вторых, остаётся неясным то, как поведут себя редкоземельные элементы и Bi при вытяжке волокна из преформы на основе ПС. Наконец, необходимо провести исследование способов оптимизации состава легированных ПС с целью увеличения эффективности волоконных световодов на их основе.

### **Цель и задачи диссертационной работы**

**Целью диссертационной работы** является проведение поисковых исследований по разработке метода получения и исследованию спектрально-люминесцентных характеристик волоконных световодов, сердцевина которых изготовлена на основе нанопористых стёкол, легированных редкоземельными f-элементами или висмутом.

В соответствии с поставленной целью планировалось решить следующие **задачи**:

1. Определить химический состав ПС, подходящих по физико-химическим свойствам для создания преформ волоконных световодов.
2. Разработать метод получения оптических однородных материалов на основе ПС, пропитанных растворами, содержащими висмут и редкоземельные элементы: определить оптимальные условия пропитывания прекурсорами, выявить кинетику термического разложения пропитывающих веществ.
3. Провести исследования структурных и спектрально-люминесцентных особенностей консолидированных легированных ПС. Провести поисковое исследование способов улучшения спектрально-люминесцентных свойств легированных ПС.
4. Разработать метод изготовления волоконных световодов с сердцевиной из легированного ПС. Выявить критически важные параметры ПС для данного процесса. Получить экспериментальные образцы с длиной не менее 100 м и провести исследование влияния высокотемпературной обработки в процессе вытяжки на их люминесцентные свойства.

### **Научная новизна**

1. Определены требования к составу ПС, при соответствии которым они могут быть использованы для изготовления сердцевины волоконных световодов.
2. Изучены спектрально-люминесцентные свойства консолидированных ПС, легированных висмутом в больших концентрациях, вплоть до 0.8 ат.%. Они аналогичны по свойствам MCVD-стёклам с висмутом.
3. Впервые изготовлены волоконные световоды с сердцевиной из консолидированного ПС, активированного Ce/Dy/Bi.
4. Обнаружен эффект значительного (более одного порядка величины) увеличения интенсивности ИК люминесценции, относящейся к висмутовым активным центрам,

ассоциированным с алюминием (ВАЦ-Al), при введении тантала в ПС, содержащие висмут.

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

1. Определены требования к составу ПС, при соответствии которым они могут быть использованы для изготовления волоконных световодов. В частности, определены предельные концентрации бора и натрия, при которых ещё не развиваются физико-химические процессы, нарушающие структуру стекла с образованием газовых включений при высокотемпературной обработке.
2. С учётом особенностей термического разложения исходных соединений (прекурсоров активаторов) определены параметры (температура и длительность) 4-х стадийного процесса консолидации ПС для получения однородных по химическому составу материалов, используемых в качестве сердцевины волоконных световодов. Благодаря исследованию зависимости интенсивности люминесценции от концентрации легирующих добавок (Bi, Ce или Dy) установлены их оптимальные концентрации для введения в ПС.
3. Впервые изготовлены волоконные световоды с сердцевиной из консолидированного ПС, активированного Ce/Dy/Bi, которые, благодаря физико-химическим и спектрально-люминесцентным свойствам, могут быть использованы для создания волоконно-оптических устройств.
4. Продемонстрировано, что волоконный световод с сердцевиной из консолидированного ПС, содержащего ионы  $\text{Ce}^{3+}$ , обладает сцинтилляционными свойствами, эффективными для регистрации  $\gamma$ -излучения.
5. В волоконном световоде, легированном ионами  $\text{Dy}^{3+}$ , при возбуждении на длине волны 445 нм наблюдалась интенсивная жёлтая люминесценция ( $\lambda=586$  нм), которая может быть использована для создания лазеров видимого диапазона.
6. Экспериментально обнаружен эффект увеличения интенсивности люминесценции в области ближнего ИК диапазона при солегировании ПС висмутом и танталом. Применение такого солегирования при изготовлении волоконных лазеров и усилителей позволит повысить их эффективность.

### **Методология и методы исследования**

В работе использованы следующие методы исследования: атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой; энергодисперсионный микроанализ; сканирующая электронная микроскопия; просвечивающая электронная микроскопия;

рентгенофазовый анализ; измерение спектров люминесценции и дозиметрия. Объем пор стёкол измерялся методом Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ) по адсорбции паров азота. Состав и чистота используемых реактивов подтверждаются паспортами образцов, предоставленными производителями.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Волоконные световоды с минимальным уровнем оптических потерь ниже 1 дБ/м в ближней инфракрасной области спектра можно изготовить на основе нанопористого стекла с остаточным содержанием натрия и бора (<1.73 вес.% и <0.22 вес.%, соответственно), полученного методом двухфазного разделения.
2. Активные световоды в УФ, видимой и ближней ИК областях, изготовленные из консолидированного в процессе четырёхстадийной тепловой обработки нанопористого стекла, легированного висмутом, церием или диспрозием, обладают спектрально-люминесцентными свойствами, которые соответствуют аналогичным материалам, полученным другими методами.
3. Солегирирование танталом нанопористого стекла, содержащего висмут, приводит к росту интенсивности полосы ИК люминесценции висмутовых активных центров, ассоциированных с Al.
4. Разработанный световод с сердцевиной из нанопористого стекла, содержащего ионы  $\text{Ce}^{3+}$ , обладает достаточными сцинтилляционными свойствами для создания волоконного сцинтилляционного детектора для регистрации  $\gamma$ -излучения.

#### **Личный вклад диссертанта**

Диссертационная работа является результатом многолетней работы автора, включающей в себя создание экспериментальных образцов, их исследование, анализ и систематизацию полученных данных. Все результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Тематика, цели и задачи были определены научным руководителем Вельмискиным Владимиром Владимировичем совместно с автором. Все экспериментальные образцы и световоды были изготовлены лично автором в Научном центре волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН (НЦВО РАН) – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН). В Лаборатории волоконной оптики НЦВО РАН и в Лаборатории волоконных лазеров и усилителей НЦВО РАН производились измерения основных спектрально-люминесцентных свойств лично диссертантом или при его непосредственном участии. Структурные исследования проводились в

Аналитическом центре НЦВО РАН Исхаковой Людмилой Дмитриевной при непосредственном участии автора. Анализ полученных результатов, дальнейшее планирование экспериментов и написание статей осуществлялось диссертантом в тесном взаимодействии с сотрудниками Лаборатории технологии волоконных световодов НЦВО РАН и Аналитического центра НЦВО РАН. Исследование радиолюминесцентных свойств световодов проводилось сотрудником Лаборатории специальных волоконных световодов НЦВО РАН Кашайкиным Павлом Фёдоровичем.

**Степень достоверности полученных результатов** обеспечивается использованием комплекса современных методов исследования, надёжной статистикой экспериментов, анализом литературных данных и сравнением экспериментально полученных данных с результатами последующих исследований других групп.

#### **Апробация работы**

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на конференциях и научных школах: 61-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный, 2018 год); Всероссийская конференция по волоконной оптике «ВКВО-2019» и «ВКВО-2021» (г. Пермь, 2019 и 2021 год соответственно); XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова (г. Можайск, 2019 год); IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике (г. Москва, 2020 год); Школа-конференция молодых учёных «Прохоровские недели» (г. Москва, 2020 год).

#### **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы представлены в 5 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК и в трудах конференций.

#### **Структура диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка используемых сокращений и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок и 8 таблиц. Список литературы содержит 134 наименования.

#### **Содержание работы**

**Во введении** обсуждается актуальность диссертационной работы, определена цель и соответствующие ей задачи, обоснованы научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена литературному обзору по теме исследования.



**В разделе 1.1** описана технология изготовления нанопористых стёкол. Приведён механизм образования нанопористого каркаса при двухфазном разделении щелочноборосиликатного стекла. Рассмотрена история пропитывания ПС растворами, содержащими редкоземельные элементы.

**В разделе 1.2** описана история изготовления волоконных световодов с сердцевиной, легированной  $\text{Bi}$ , с помощью различных методов. Приведено описание основных люминесцирующих  $\text{Bi}$ -центров в различных стеклянных матрицах.

**Раздел 1.3** посвящен литературному обзору материалов о легировании  $\text{Ce}$  стёкол для создания волоконных световодов на их основе. Описан механизм радиолюминесценции, возникающей при облучении материалов, содержащих ионы  $\text{Ce}^{3+}$ . Рассмотрена история исследования световодов, легированных  $\text{Ce}$ .

Обзору работ по легированию люминесцирующих материалов  $\text{Dy}$  посвящен **раздел 1.4**. Описан механизм возникновения жёлтой люминесценции и её особенности. Рассмотрена история получения лазерных материалов с  $\text{Dy}$ , позволяющих получать жёлтое лазерное излучение.

**Вторая глава** посвящена экспериментальным образцам ПС и методам их исследования. Представлена общая схема легирования ПС растворами редкоземельных элементов. Описаны методы исследования структурных и спектрально-люминесцентных свойств образцов.

**В разделе 2.1** описан процесс обработки трёх марок стёкол, используемых в данной работе: Corning Vycor 7930 Porous Glass от компании Corning Inc., США («Corning»); ПС, предоставленные национальной лабораторией оптоэлектроники Уханьского университета науки и технологий, г. Ухань, Китай («Wuhan»); ПС, изготовленные на кафедре химической технологии стекла и ситаллов Российского Химико-Технологического Университета им. Д.И. Менделеева («РХТУ»).

Для всех марок ПС был разработан единый процесс легирования и консолидации в трубчатой печи с системой подачи газов:

- 1) Предварительная осушка образца неконсолидированного ПС в атмосфере  $\text{He}$ ;
- 2) Пропитывание образца растворами солей легирующего элемента;
- 3) Просушивание образца ( $100^\circ\text{C}$ );
- 4) Термическое разложение прекурсоров внутри пор ( $300\text{-}700^\circ\text{C}$ );
- 5) Консолидация ПС ( $1100^\circ\text{C}$ ).

Изготовление преформ волоконных световодов с сердцевиной из легированного стекла производилось методом «стержень-в-трубе». Образец консолидированного стекла травился в растворе плавиковой кислоты для очистки от загрязнений и удаления поверхностного слоя, после чего на него на стеклодувном станке жакетировалась световедущая оболочка соответствующего диаметра из особо чистого кварцевого стекла (Heareus Suprasil F300, F520). В отдельных преформах использовалась микроструктурированная оболочка с отверстиями, полученными методом сверления.

Из полученных преформ вытягивались волоконные световоды на установке для вытяжки волоконных световодов на основе кварцевого стекла «Special Gas Control», Великобритания, входящей в состав уникальной научной установки «Научно-технологический комплекс для создания и исследования волоконных световодов/волноводов для генерации и передачи электромагнитного излучения от ультрафиолетового до терагерцового диапазонов» (УНУ ВОЛОКНО).

**Раздел 2.2** посвящён описанию методов исследования образцов. Состав стёкол был изучен с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) (iCAP6300 DUO). Дополнительные сведения о составе и распределении элементов были получены с помощью энергодисперсионного микроанализа (ЭДМА) (СЭМ JSM5910-LV, JEOL).

Микроструктура ПС изучалась с помощью двулучевых сканирующих электронных микроскопов (СЭМ) (модели TESCAN LYRA3 с традиционной электронной оптикой и TESCAN GAIA3 с иммерсионной электронной оптикой).

Изображения просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и микродифракционные электронограммы микро- и нанообластей были получены с помощью высокоразрешающего микроскопа JEOL JEM 2010. Для установления элементного состава нанообластей использовалась аналитическая система INCA Energy (Oxford Instruments).

Рентгенофазовый анализ (РФА) производился с помощью дифрактометра D2 PHASER (Bruker) с источником  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения ( $\lambda = 1.5418\text{\AA}$ ). Обработка результатов осуществлялась с помощью программы DIFFRACplus (EVA и TOPAS 4.2.0.2). Анализ распределения пор по размерам производился с помощью метода Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ) по адсорбции паров азота.

Спектр люминесценции измерялся с помощью оптического спектроанализатора ANDO AQ-6315A. В качестве источника возбуждения использовался либо криптон-аргоновый лазер Spectra-Physics 2018-RM с рабочими длинами волн 488 нм (100 мВт) или 676 нм (120 мВт), либо диодный лазер с рабочей длиной волны 445 нм (1 Вт), либо диодный лазер с рабочей длиной

волны 960 нм (<1.5 Вт). Для измерения спектра поглощения слабого сигнала в световоде использовался метод облома (“cut-back”).

Времена жизни люминесценции измерялись двумя методами. В первом случае в качестве накачки использовали азотный импульсный лазер ЛГИ-21. С помощью задающего генератора Г5-63 он синхронизировался с осциллографом Tektronix TDS3052B. Монохроматор МДР-23 (ЛОМО) выделял необходимую область спектра. На выходе монохроматора импульс регистрировался фотоумножителем ФУ-100, сигнал с которого попадал на осциллограф. Во втором случае использовали флуориметр FLSP920 (Edinburgh Instruments) с ксеноновой лампой-вспышкой. Флуориметр также позволил построить двумерные карты люминесценции.

Для исследования радиолюминесценции волоконных световодов они облучались на источнике  $^{60}\text{Co}$  со средней энергией  $\gamma$ -квантов 1,25 МэВ при мощности дозы 3,5 Гр/с до поглощенной дозы 2100 Гр в течение 10 мин. Спектры регистрировались с помощью спектрометра AvaSpec 3648 фирмы Avantes (200-1100 нм). Дозиметрия проводилась с помощью стеклянных детекторов СГД-8.

**Третья глава** посвящена исследованию ПС трёх марок с точки зрения их применимости для вытягивания световодов. Для того, чтобы стекло было пригодным для процесса изготовления световода, необходима его физико-химическая устойчивость при нагреве до 2000°C.

Обнаружено, что стёкла «Corning» и «Wuhan» обладают физико-химической устойчивостью к высокотемпературному нагреву. В стёклах серии «РХТУ» происходило газообразование при нагреве пропан-кислородной горелкой, поэтому они не пригодны для вытягивания световодов.

В таблице 1 представлены данные о концентрации примесей в ПС. Исходя из данных о температурной физико-химической устойчивости стёкол, составы стёкол «Corning» и «Wuhan» подходят для вытягивания световодов, а из данных о концентрации примесей следует, что 1.73 вес.% по бору и 0.22 вес.% по натрию – это пороговые значения концентраций примесей, при которых стёкла остаются пригодными для вытяжки световодов.

**Таблица 1** – Концентрация примесей в ПС.

	«Corning»	«Wuhan»	«РХТУ»
Массовая доля	вес. %	вес. %	вес. %
Бор (В)	0.97	1.73	2.18
Алюминий (Al)	0.1	0.054	0.054
Натрий (Na)	$8.4 \cdot 10^{-3}$	0.22	0.5
Железо (Fe)	$6.2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$
Другие переходные металлы (Cu, Cr, Ni, V, Co, Mo)	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$

В стёклах содержится заметное количество Al, который понижает температуру стеклования и увеличивает прочность нанопористого каркаса кварцевого стекла. При пропитывании ПС Al способствует растворению РЗЭ в сетке стекла и образованию ВАЦ-Al.

В стекле содержатся примеси переходных металлов, в частности, железа. В такой концентрации железо вносит потери порядка 1 дБ/м в видимой и ближней ИК-области [10]. Для дальнейшего использования стёкол «Wuhan» и «Corning» для создания оптически качественных световодов их необходимо очистить от примесей переходных металлов.

Установлены основные характеристики ПС. Средний размер пор в стёклах «Corning» составляет 4 нм (и он однороден по объёму), а пористый объём составляет 28%. Для стёкол «Wuhan» методом БЭТ установлено, что средний размер пор также 4 нм с однородным распределением по объёму, за исключением приповерхностного слоя толщиной 150-250 нм, где поры достигают 40 нм в диаметре. Пористый объём составляет ~40%.

**Четвёртая глава** посвящена легированию Vi ПС. Световоды с сердцевинной на основе стёкол, легированных Vi, интересны для создания лазеров и усилителей в диапазонах, недоступных волоконным лазерам и усилителям на основе РЗЭ (Рисунок 1).

Чтобы повысить эффективность висмутовых лазеров, необходимо увеличивать поглощение, связанное с ВАЦ. Это можно сделать двумя способами: за счёт уменьшения кластеризационных эффектов, вносящих непроектные потери при повышении концентрации Vi, и за счёт увеличения доли необходимых ВАЦ среди всех висмутовых центров за счёт стабилизации ионного состояния Vi.

**В разделе 4.1** подробно описан метод синтеза ПС, легированных Vi.

**В разделе 4.2** описан процесс создания и исследования консолидированных ПС «Wuhan», легированных Vi, а также световодов на их основе.

Были приготовлены водные растворы нитрата висмута в концентрации от 0.01М до 1.0М. После пропитывания ими была получена концентрационная серия образцов, в которых среднее содержание Vi варьировалось от 0.01 до 0.85 ат.%. На Рисунке 2 представлен образец с концентрацией Vi 0.85 ат.%. Он остался бесцветным и прозрачным. В то же время, в преформах, изготовленных по технологии MCVD, уже при концентрации Vi ~0.02 ат.% наблюдается покраснение и почернение стекла [119]. Анализ РФА также не показал наличия нановключений кластеров Vi. Таким образом, ПС действительно позволяет обеспечить более однородное пространственное распределение ионов Vi, тем самым увеличивая его предельно вводимую концентрацию без видимых следов кластеризации.



Рисунок 2 – Микрофотография образца пористого стекла с содержанием Bi 0.85 ат.%.

Были проведены исследования спектрально-люминесцентных свойств полученных образцов. Основными центрами люминесценции являются ионы  $\text{Bi}^{2+}$  (с длиной волны люминесценции  $\sim 600$  нм) и ВАЦ-Al ( $\sim 730$  и  $1150$  нм). Максимум интенсивности полос люминесценции достигается при концентрациях  $\sim 0.1-0.2$  ат.%. Полосы возбуждения люминесценции на длине волны  $1150$  нм имеют типичные положения для ВАЦ-Al:  $500$  и  $700$  нм. Времена жизни данной люминесценции, составившие  $739-777$  мкс, укладываются в данные об этом типе центров [5]. Таким образом, спектрально-люминесцентные свойства консолидированных ПС, легированных Bi, не отличаются от свойств стёкол, изготовленных другими методами.

Из образцов со средней концентрацией Bi  $0.05$  ат.% и  $0.55$  ат.% были изготовлены два световода с отражающей оболочкой с пониженным показателем преломления, выполненной из фторированной трубы. На Рисунке 3 представлены спектры поглощения полученных образцов в сравнении с типичным алюмосиликатным световодом, изготовленным по технологии MCVD. Отличие полученного световода от MCVD-световода с близкой концентрацией Bi наблюдается только в области поглощения ОН-группами.

Были изготовлены два световода с сердцевинкой на основе легированного ПС стекла во фторированной оболочке. Один легировался только висмутом (Bi:  $0.14$  ат.%, Al:  $0.19$  ат.%), другой – висмутом и алюминием (Bi:  $0.07$  ат.%, Al:  $0.82$  ат.%). В них измерены потери (Рисунок 4). Они состоят из пика поглощения ВАЦ-Al на  $1000$  нм и пиков поглощения ОН-групп на  $1232$  и  $1386$  нм. Кроме того, существует «полка потерь» порядка  $0.5-1.0$  дБ/м в области  $1000-1300$  нм, связанная с наличием переходных металлов (железа) в исходной матрице ПС.

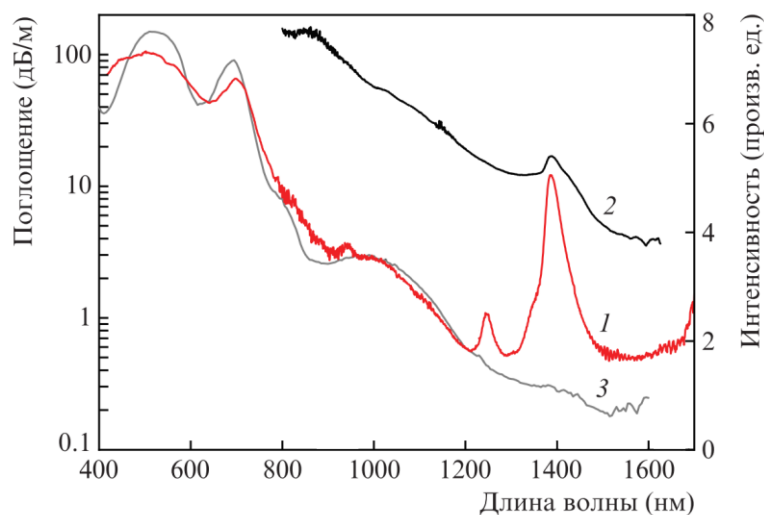
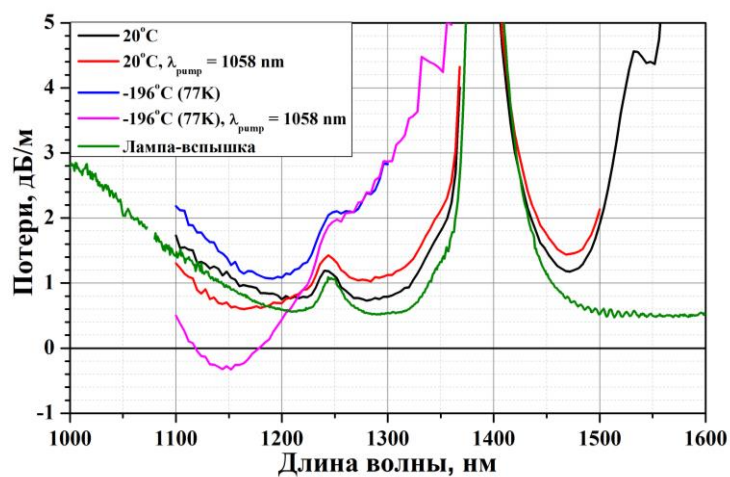
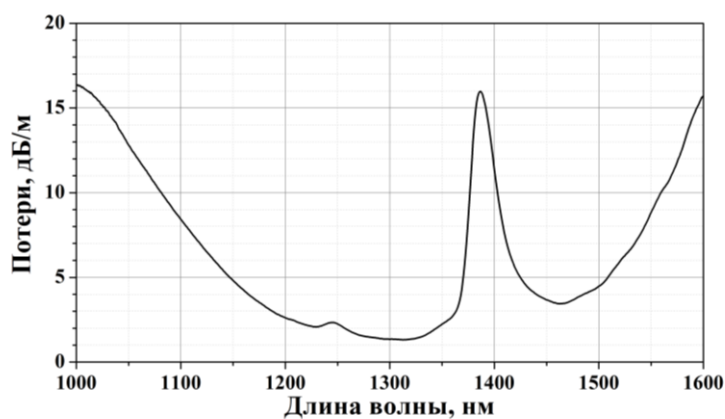


Рисунок 3 – Спектры поглощения световодов с концентрацией  $\text{Bi}$  0.05 (1) и 0.55 ат. % (2). Для сравнения показан спектр поглощения алюмосиликатного световода, легированного  $\text{Bi}$ , изготовленного методом MCVD с концентрацией  $\text{Bi}$  менее 0.02 ат. % (3).



а)



б)

Рисунок 4 – Потери в световодах с сердцевиной из легированного ПС: а) содержание  $\text{Bi}$ : 0.14 ат.%;  $\text{Al}$ : 0.19 ат.%; б) содержание  $\text{Bi}$ : 0.07 ат.%;  $\text{Al}$ : 0.82 ат. %.

В световоде, легированном только  $\text{Vi}$ , удалось получить окно просветления и отрицательных потерь ( $\approx -0.3$  дБ/м в диапазоне 1120-1180 нм) при условии накачки лазером с длиной волны 1058 нм и при температуре жидкого азота. Тем не менее, генерацию лазерного излучения в данном диапазоне получить не удалось.

В световоде, легированном  $\text{Vi}$  и  $\text{Al}$ , наблюдается кратный рост полосы поглощения ВАЦ- $\text{Al}$  при меньшей концентрации  $\text{Vi}$ . Это указывает на то, что добавление  $\text{Al}$  позволило создать большее число вакансий для ионов  $\text{Vi}$  и, как следствие, привело к образованию большего числа ВАЦ- $\text{Al}$  среди всевозможных состояний  $\text{Vi}$  в стекле.

**В разделе 4.3** рассмотрены микроструктурированные световоды с легированной и нелегированной сердцевиной из ПС «Corning». Люминесцентные свойства преформы и световода, легированных  $\text{Vi}$ , остались неизменными после вытяжки световода в атмосфере аргона.

Спектры поглощения полученных образцов содержат характерные полосы поглощения  $\text{Vi}$  в алюмосиликатных стёклах на длинах волн: 500, 700, 800 и 1000 нм. При легировании  $\text{Vi}$  образуются ВАЦ- $\text{Al}$ , с люминесценцией на длине волны 1150 нм. Однако отсутствует люминесценция от ВАЦ- $\text{Si}$  с пиком на 1400 нм. Такое поведение люминесценции согласуется ранее описанными световодами с  $\text{Vi}$ , сделанными по технологии MCVD. Также продувка воздушных каналов аргоном сохраняет люминесцирующие центры при высоких температурах во время вытяжки.

В нелегированном световоде уровень серых потерь в ИК-области составляет 1 дБ/м. Эти потери связаны с влиянием переходных металлов в каркасе ПС. Уменьшение их концентрации на два порядка позволило бы уменьшить серые потери до  $\sim 0.01$  дБ/м. Тогда вклад в общие потери станет незначительным по сравнению с ненасыщаемыми потерями от ВАЦ.

**Раздел 4.4** посвящён солегированию  $\text{Vi}$  и  $\text{Ta}$  в ПС «Corning». При изготовлении световодов с  $\text{Vi}$  большая его часть находится в неактивном состоянии [11]. Возможным решением этой проблемы может стать добавление модифицирующих добавок в стекло, которые бы инициировали образование требуемых ВАЦ вместо неактивных форм  $\text{Vi}$ -центров, например, тантала. До данной работы этот эффект наблюдался при больших (несколько мол.%) концентрациях тантала, и не был обнаружен в алюмосиликатных стёклах.

Было изготовлено 4 образца стёкол методом двухстадийной пропитки. Во всех образцах были изучены люминесцентные свойства и построены карты люминесценции, представленные на Рисунке 5. Обнаружено, что в алюмосиликатной матрице стекла добавление тантала позволяет на порядок увеличить интенсивность полос ИК-люминесценции, связанной с ВАЦ- $\text{Al}$ . При этом практически не наблюдается интенсификации люминесценции от других центров с  $\text{Vi}$ , поэтому

можно говорить, что тантал способствует росту числа ВАЦ-А1 за счёт уменьшения доли неактивных Vi-центров.

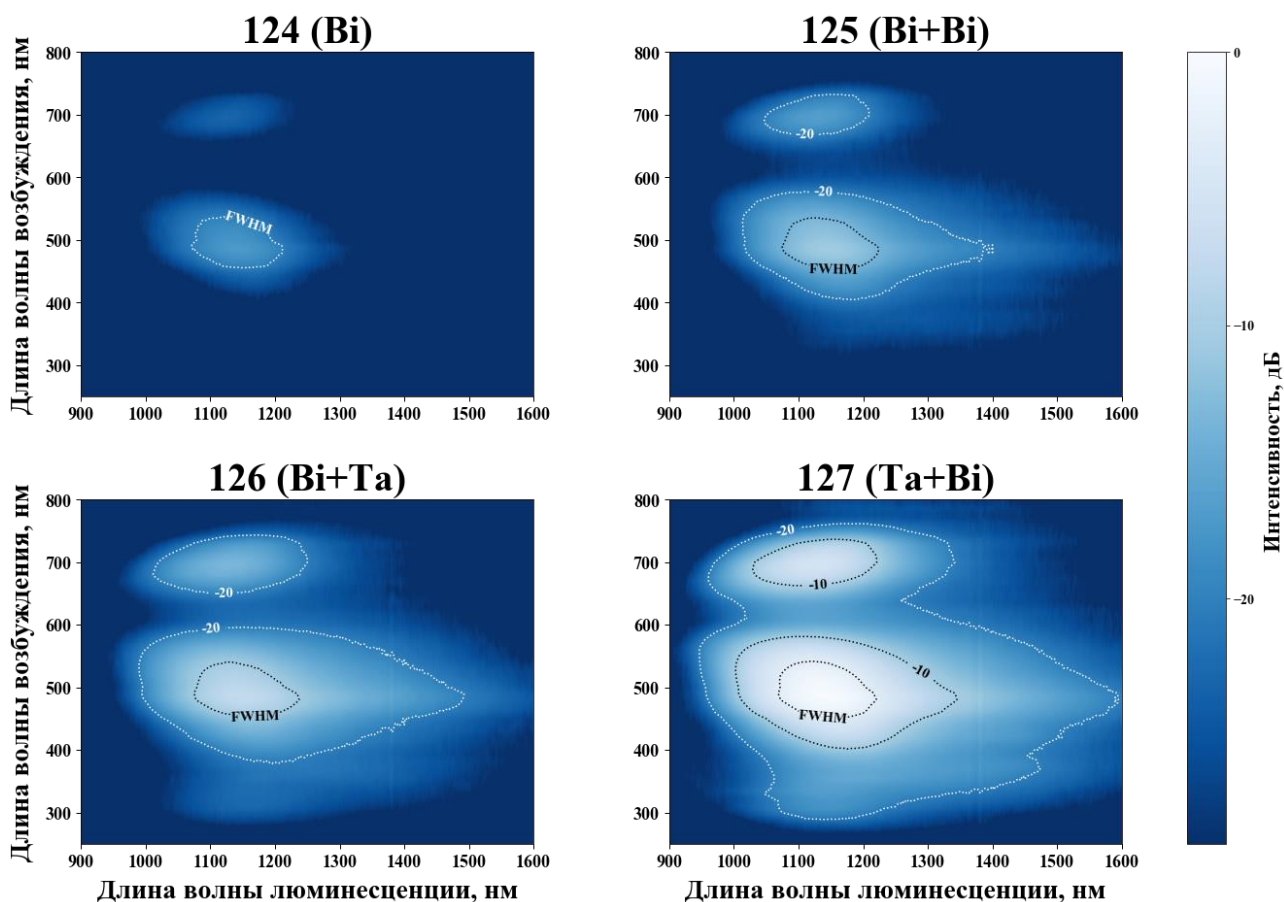


Рисунок 5 – Нормализованная карта люминесценции. Максимальная интенсивность на длине волны люминесценции 1150 нм для №124: -17.1 дБ; №125: -10.4 дБ; №126: -7.3 дБ; №127: 0.0 дБ.

**Пятая глава** посвящена легированию Се ПС для создания сердцевин волоконных световодов. Стёкла, легированные Се, используются дозиметрии в качестве детекторов рентгеновского, нейтронного и  $\gamma$ -излучений.

**В разделе 5.1** подробно описан метод синтеза ПС, легированных Се.

**В разделе 5.2** изучен процесс термического разложения селената церия, используемого для пропитывания ПС. Показано, что кристаллогидрат селената церия становится безводным к 200°C. К 500°C основной фазой становится  $\text{CeO}_2$ , а к 1000°C улетучивается весь селен. Таким образом, растворы селенатов РЗЭ могут быть использованы для пропитывания ПС наравне с растворами нитратов и хлоридов.

**В разделе 5.3** рассмотрено получение объёмных образцов консолидированных ПС, легированных Се. Получена серия стёкол с концентрацией Се от 0.02 до 0.07 ат.%.



Предварительное вытравливание ПС плавиковой кислотой позволило увеличить вводимую концентрацию Се до 0.6 ат.%. Методом РФА определено образование нанокристаллических включений  $\text{CeO}_2$  даже в образцах с относительно низкой концентрацией Се.

Был изготовлен образец стекла для проверки влияния высокотемпературной обработки. Его люминесцентные свойства изучались дважды: после спекания и после дополнительно термической обработки при температуре более  $1600^\circ\text{C}$ .

Карты люминесценции образца представлены на Рисунке 6. До высокотемпературной обработки люминесценция состоит из двух пиков на 420 нм и 470 нм, с длиной волны возбуждения 320 нм. Эти значения типичны для активных центров  $\text{Ce}^{3+}$  и соответствуют разрешённому электрическому дипольному переходу 5d-4f данного иона [12]. Кроме того, неоднородность структуры стекла приводит к существованию пиков рассеяния, которые образуют две диагональные структуры на карте на Рисунке 6а.

Высокотемпературная обработка изменила люминесцентные свойства стекла. Во-первых, стекло стало однородным и прозрачным (Рисунок 6б), а пики рассеяния исчезли. Во-вторых, интенсивность люминесценции центра  $\text{Ce}^{3+}$  выросла в 4 раза. Это связано с трансформацией нанокластеров  $\text{Ce}^{4+}$  в ионы  $\text{Ce}^{3+}$ , что также приводит к исчезновению рассеяния и росту числа активных центров  $\text{Ce}^{3+}$ . Наконец, полоса люминесценции становится единой и неоднородно уширенной. Таким образом, обработка при температуре более  $1600^\circ\text{C}$  гомогенизирует состав, увеличивает долю активных центров  $\text{Ce}^{3+}$  и интенсивность соответствующей люминесценции.

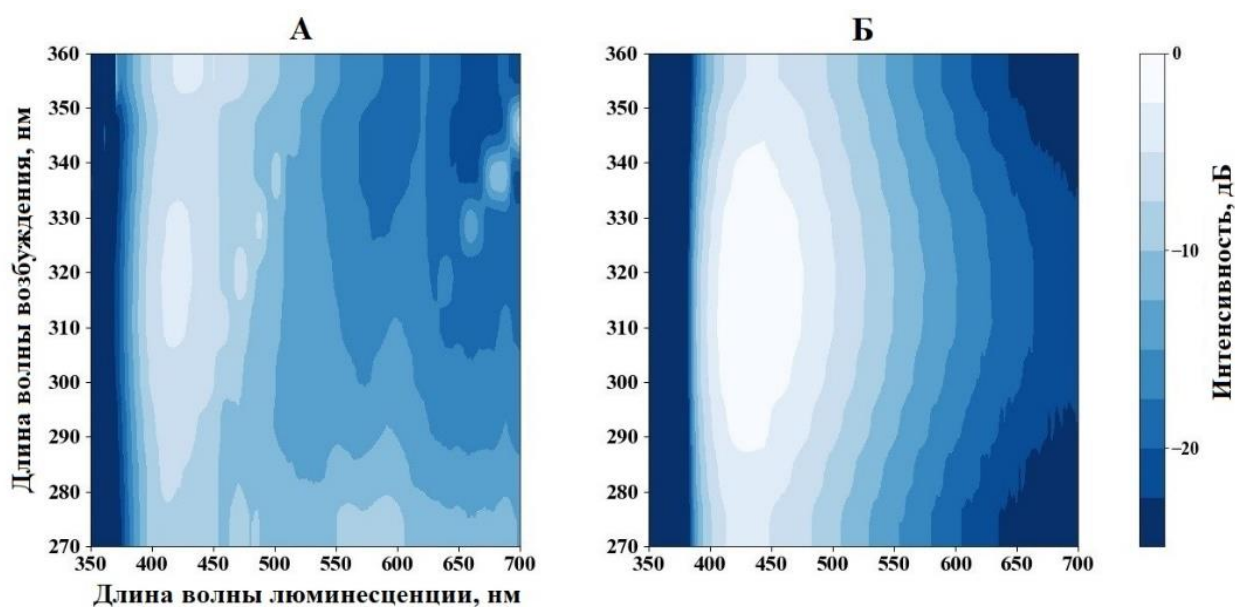


Рисунок 6 – Люминесценция в образце:

а) карта до обработки при  $1600^\circ\text{C}$ ; б) карта после обработки при  $1600^\circ\text{C}$ .

Ряд образцов был использован в качестве материала сердцевины для изготовления волоконных световодов. Содержание Се в волоконном световоде в зависимости от состава ПС составляло 0.02-0.06 ат.% и не изменялось после вытяжки почти во всех образцах.

Полученные световоды были облучены  $\gamma$ -излучением для изучения радиолюминесцентных свойств. Во всех световодах возникала полоса радиолюминесценции с максимумом на длине волны 450 нм (Рисунок 7). В процессе облучения её интенсивность для всех световодов практически не изменялась, что говорит о незначительном влиянии радиационно-наведенных потерь на радиолюминесценцию. Из спектров радиолюминесценции видно, что с увеличением концентрации Се интенсивность этого пика уменьшается, а вклад рассеяния в люминесценцию наоборот, увеличивается.

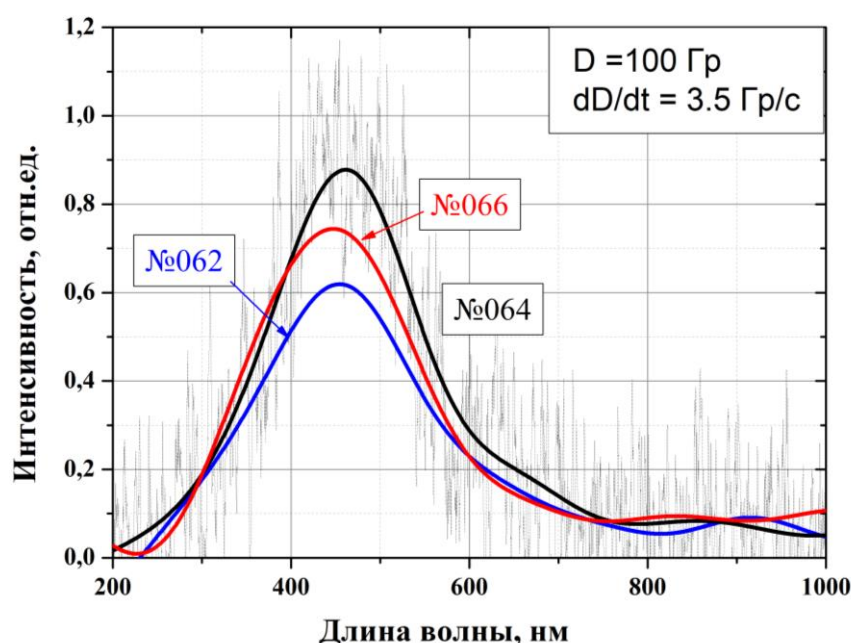


Рисунок 7 – Радиолюминесценция под  $\gamma$ -излучением световодов с Се.

По содержанию Се полученные в данной работе волоконные световоды соответствуют тому уровню концентраций, который использован в материалах, демонстрирующих высокую эффективность и перспективность для применения в удалённой дозиметрии [13, 14]. Полученные результаты исследования радиолюминесцентных свойств волоконных световодов показывают возможность их использования в дозиметрии.

**Шестая глава** посвящена легированию Ду ПС.

**В разделе 6.1** подробно описан метод синтеза ПС, легированных Ду.

**Раздел 6.2** посвящён исследованию консолидированных образцов ПС, легированного Ду. Для этого была изготовлена серия образцов с концентрацией Ду от 0.01 до 0.8 ат.%. Обнаружено,

что при концентрации более 0.1 ат.% происходит ликвация стекла на две фазы, одна из которых обогащена Dy. Этот процесс даёт ограничение сверху на оптимальную концентрацию Dy в ПС: ~0.08 ат.%.

Проведено исследование люминесцентных свойств образцов при возбуждении лазером с длиной волны 445 нм (Рисунок 8). Получаемая картина люминесценции качественно совпадает с люминесценцией, наблюдаемой в стёклах ZBLAN:Dy [15] или в алюмосиликатном волоконном световоде с Dy, изготовленном по технологии MCVD [16]. Максимум интегральной интенсивности в жёлтой области наблюдается при концентрации Dy ~0.05-0.08 ат.%. Данный диапазон концентрации Dy можно считать оптимальным.

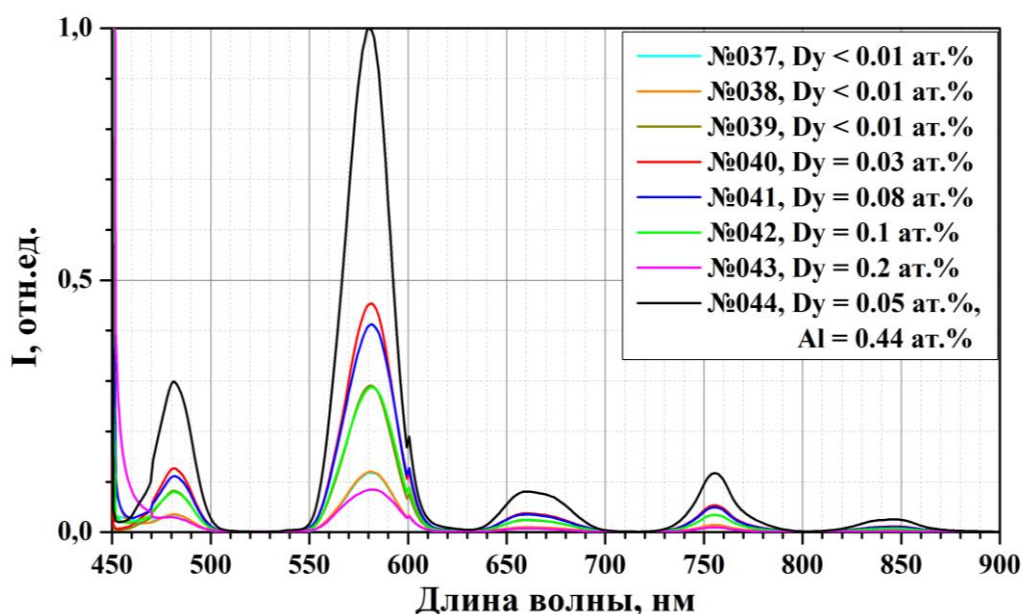


Рисунок 8 – Спектры люминесценции в объёмных образцах. Длина волны возбуждения 445 нм.

Также было измерено время жизни верхнего лазерного уровня  $^4F_{9/2}$ , которое составило 596 мкс. Это значение согласуется с данными, полученными для подобных стеклянных матриц с Dy другими группами: алюмосиликатной (500 мкс) [16], алюмогерманосиликатной (710 мкс) [17] и из чистого кварцевого стекла (550 мкс) [18].

**В разделе 6.3** исследованы свойства микроструктурированного световода с сердцевиной из ПС, легированного оптимальной концентрацией Dy.

Спектр оптических потерь слабого сигнала световода с Dy состоит из ряда характерных полос, расположенных в областях длин волн 400-500 нм и 700-900 нм. Поглощение в области длины волны 445 нм составляет более 10 дБ/м, тогда как уровень спектрально-неселективных потерь – около 3 дБ/м, который, по-видимому, обусловлен высоким остаточным содержанием

железа в матрице ПС. После вытяжки световода форма спектра люминесценции осталась неизменной. Время жизни верхнего лазерного уровня составило 572 мкс.

Таким образом, высокотемпературная обработка при изготовлении световода с сердцевинной из кварцевого ПС, легированного Dy, не влияет на его люминесцентные свойства. Значит, ПС, легированные Dy, могут использоваться для изготовления сердцевин активных волоконных световодов.

В качестве **заключения** приводятся основные результаты диссертационной работы. Далее следует список используемых сокращений и список литературы.

### Основные результаты работы

1. Показана принципиальная возможность использования нанопористых стёкол, полученных химическим травлением концентрированными соляной и азотной кислотами, с остаточными концентрациями бора (<1.73 вес.%) и натрия (<0.22 вес.%) для создания сердцевинной волоконного световода. Экспериментально установлено, что в таких стеклах при  $T \sim 1600^\circ\text{C}$  не происходит заметных физико-химических процессов, сопровождающихся газообразованием, что позволяет осуществить консолидацию пористого стекла в монолитный (без газовых включений) материал оптического качества. Были изготовлены световоды с сердцевинной из консолидированного нанопористого стекла с минимальным уровнем оптических потерь <1 дБ/м в ближней ИК-области.
2. Определены температурно-временные режимы четырехстадийного (нанопористое стекло  $\xrightarrow{100^\circ\text{C}, 1\text{ч}}$  \*  $\xrightarrow{300^\circ\text{C}, 1\text{ч}}$  \*  $\xrightarrow{700^\circ\text{C}, 1\text{ч}}$  \*  $\xrightarrow{1100^\circ\text{C}, 2\text{ч}}$  монолитное стекло) процесса консолидации пористых (с размером пор  $\approx 4$  нм) стёкол, активированных ионами Dy (до 0.2 ат.%), Bi (до 0.8 ат.%) и Ce (до 0.6 ат.%), с учётом особенностей термического разложения используемых исходных прекурсоров, что обеспечило формирование однородных (по химическому составу и структуре) стеклянных образцов. Установлено, что во всех образцах происходит формирование люминесцентных центров, излучающих в УФ (ион  $\text{Ce}^{3+}$ ), видимом (ион  $\text{Dy}^{3+}$ ) и ближнем ИК (висмутовый активный центр) диапазонах.
3. Впервые изготовлены волоконные световоды с сердцевинной из консолидированного нанопористого стекла, активированного Ce/Dy/Bi. Показано, что спектрально-люминесцентные (форма спектров и времена затухания люминесценции, структура спектров возбуждения люминесценции) и абсорбционные свойства полученных образцов сопоставимы с аналогичными лазерно-активными материалами, полученными другими методами. Продемонстрировано, что разработанный световод с сердцевинной, содержащей

ионы  $Ce^{3+}$ , может быть использован для создания волоконного сцинтилляционного детектора для регистрации  $\gamma$ -излучения. При возбуждении с длиной волны 445 нм волоконного световода с ионами  $Dy^{3+}$  наблюдалось интенсивное “жёлтое” свечение (длина волны 586 нм) со временем жизни 572 мкс, которое может потенциально быть использовано для создания лазеров видимого диапазона.

4. Экспериментально установлено, что в полученном висмутовом световоде формируются висмутовые активные центры, ассоциированные с атомом Al (ВАЦ-Al), имеющие полосу люминесценции в области длины волны 1150 нм. Обнаружен эффект роста интенсивности данной полосы ИК-люминесценции, вызванный введением в нанопористое стекло ионов тантала (~0.01 ат.%) совместно с висмутом на стадии пропитки. Наблюдаемый рост интенсивности полосы ИК-люминесценции в таких стеклах (при прочих равных условиях), по-видимому, происходит за счёт увеличения концентрации ВАЦ-Al, что проявляется в возрастании интенсивности полосы оптического поглощения, соответствующей таким центрам.

#### Список литературы

1. Kao, K. C. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies / K. C. Kao, G. A. Hockham // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – IET, 1966. – Т. 113. – №. 7. – С. 1151-1158.
2. A review of the fabrication of optic fiber / X. Wang, Q. Nie, T. Xu, L. Liu // ICO20: Optical Design and Fabrication. – 2006. – Т. 6034. – С. 346-354.
3. Nagel, S.R. An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance / S. R. Nagel, J. B. MacChesney, K. L. Walker // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1982. – Т. 30. – №. 4. – С. 305-322.
4. 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. – С. 100126.
5. Bufetov, I.A. Bi-doped fiber lasers / I.A. Bufetov, E.M. Dianov // Laser physics letters. – 2009. – Т. 6. – №. 7. – С. 487.
6. Cerium-activated sol-gel silica glasses for radiation dosimetry in harsh environment / H. El Hamzaoui, B. Capoen, N. Al Helou [et al.] // Materials Research Express. – 2016. – Т. 3. – №. 4. – С. 046201.
7. The luminescence properties of Dy-doped high silicate glass / L. Nagli, D. Bunimovich, A. Katzir [et al.] // Journal of non-crystalline solids. – 1997. – Т. 217. – №. 2-3. – С. 208-214.
8.  $Yb^{3+}$ -doped large core silica fiber for fiber laser prepared by glass phase-separation technology / Y. Chu, Y. Ma, Y. Yang [et al.] // Optics letters. – 2016. – Т. 41. – №. 6. – С. 1225-1228.
9. Гирсова, М.А. Синтез, структура и спектрально-оптические свойства композиционных материалов на основе силикатных пористых стекол, содержащих галогениды серебра или оксиды висмута : специальность 02.00.04 «Физическая химия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / Гирсова Марина Андреевна – Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН. – Санкт-Петербург, 2015. – 170 с.

10. Schultz, P. C. Optical absorption of the transition elements in vitreous silica / P. C. Schultz // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1974. – T. 57. – №. 7. – C. 309-313.
11. Bismuth valence states and emission centers in Mg-Al-silicate glass / B. I. Denker, B. I. Galagan, I. L. Shulman [et al.] // *Applied Physics B*. – 2011. – T. 103. – C. 681-685.
12. Ce<sup>3+</sup> doped inorganic scintillators / C. W. E. van Eijk, J. Andriessen, P. Dorenbos, R. Visser // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 1994. – T. 348. – №. 2-3. – C. 546-550.
13. Investigation of the incorporation of cerium ions in MCVD-silica glass preforms for remote optical fiber radiation dosimetry / M. Cieslikiewicz-Bouet, H. El Hamzaoui, Y. Ouerdane [et al.] // *Sensors*. – 2021. – T. 21. – №. 10. – C. 3362.
14. Cerium-activated sol-gel silica glasses for radiation dosimetry in harsh environment / H. El Hamzaoui, B. Capoen, N. Al Helou [et al.] // *Materials Research Express*. – 2016. – T. 3. – №. 4. – C. 046201.
15. Direct generation of watt-level yellow Dy<sup>3+</sup>-doped fiber laser / J. Zou, T. Li, Y. Dou [et al.] // *Photonics Research*. – 2021. – T. 9. – №. 4. – C. 446-451.
16. Majewski, M. R. Diode pumped silicate fiber for yellow laser emission / M. R. Majewski, S. D. Jackson // *OSA Continuum*. – 2021. – T. 4. – №. 11. – C. 2845-2851.
17. Diode pumped visible Dy<sup>3+</sup>-doped silica fiber laser: Ge-co-doping effects on lasing efficiency and photodarkening / T. Okazaki, C. Otsuka, E.H. Sekiya [et al.] // *Applied Physics Express*. – 2021. – T. 15. – №. 1. – C. 012002.
18. Dysprosium doped glasses for application in visible light sources / A. Jusza, P. Grajek, M. Karczewska [et al.] // *Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications III*. – SPIE, 2022. – C. PC121420K.

## Список работ по теме диссертации

### Список публикаций в журналах из перечня ВАК по теме диссертации:

1. Использование нанопористых стекол для изготовления активных волоконных световодов, легированных висмутом с высокой концентрацией / Е. М. Дианов, Л. Янг, Л. Д. Исхакова, В. В. Вельмискин, **Е.А. Пластинин**, Ф. О. Милович, В. М. Машинский // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48. – №. 7. – С. 658-661.
2. Microstructure, composition, and luminescent properties of bismuth-doped porous glass and optical fiber preforms / L. D. Iskhakova, V. M. Mashinsky, F. O. Milovich, V. V. Velmiskin, **E. A. Plastinin**, S. V. Fistrov, M. V. Lukashova, P. A. Somov, E. M. Dianov // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2019. – Vol. 503-504. – P. 28-35.
3. Ce-doped porous glass and optical fibers / **E. A. Plastinin**, L. D. Iskhakova, P. F. Kashaykin, V. V. Velmiskin, S. V. Firstov, F. O. Milovich // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2022. – Т. 579. – С. 121369.
4. Bismuth-doped optical fiber from nanoporous glass with air cladding / **E. A. Plastinin**, V. V. Velmiskin, L. D. Iskhakova, A. V. Kharakhordin, S. L. Semjonov // Optical Engineering. – 2022. – Т. 61. – №. 3. – С. 036108.
5. Нанопористые стёкла, легированные диспрозием, для активных волоконных световодов видимого диапазона / **Е. А. Пластинин**, Л. Д. Исхакова, С. В. Фирстов, В. М. Машинский, В. В. Вельмискин, Ф. О. Милович // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – №. 10. – С. 929-933.

### Доклады на конференциях

1. Легированные висмутом волоконные световоды с сердцевинной, изготовленной из нанопористого кварцевого стекла / **Е. А. Пластинин**, В. В. Вельмискин, Л. Д. Исхакова, В. М. Машинский, Е. М. Дианов // Труды 61-й Всероссийской научной конференции МФТИ: Фундаментальная и прикладная физика. – М.: 2018. – С. 253.
2. Изготовление активных волоконных световодов на основе легированных висмутом мезопористых стекол / Е. М. Дианов, Л. Д. Исхакова, В. В. Вельмискин, **Е. А. Пластинин**, Ф. О. Милович, В. М. Машинский, С. В. Фирстов // Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2019). – Пермь: 2019. – С. 138–139.
3. Структура и люминесцентные свойства легированных висмутом мезопористых стекол и преформ волоконных световодов на их основе / Е. М. Дианов, **Е. А. Пластинин**, Л. Д. Исхакова, В. В. Вельмискин, В. М. Машинский, С. В. Фирстов, Ф. О. Милович // Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2019). – Пермь: 2019. – С.140-141.
4. Легированные висмутом волоконные световоды на основе мезопористых стёкол» / **Е. А. Пластинин**, В. В. Вельмискин, Л. Д. Исхакова, В. М. Машинский // Труды школы-семинара «Волны-2019». Радиофотоника. – М.: 2019. – С. 12.
5. Активированные висмутом преформы, световоды, стёкла: микроструктура, состав, нановключения и Вi-кластеры / Л. Д. Исхакова, Ф. О. Милович, В. М. Машинский, В. В. Вельмискин, **Е. А. Пластинин**, А. Л. Васильев, В. И. Бондаренко, М. Ю. Пресняков // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. – М.:2020. – С. 103-104.
6. **Пластинин Е.А.** Изготовление световодов с легированной сердцевинной на основе нанопористых стёкол / **Е. А. Пластинин**, В. В. Вельмискин // Школа-конференция молодых учёных «Прохоровские недели». Тезисы докладов. – М.: 2020. – С. 22-23.
7. Влияние тантала на люминесцентные свойства алюмосиликатных стёкол, легированных висмутом / **Е. А. Пластинин**, Л. Д. Исхакова, В. В. Вельмискин, А. В. Харахордин, С. В. Фирстов, С. Л. Семёнов // Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2021). – Пермь: 2021. – С. 50-51.