

**ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

Латкин Константин Павлович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ
ЗАГОТОВОК АКТИВНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ НА
ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
ПРИМЕСИ В БЕЗЫММЕРСИОННОЙ СРЕДЕ**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Первадчук В. П.

Пермь — 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ.....	14
1.1. Физические и технологические проблемы разработки и создания активных волоконных световодов.....	14
1.1.1. Активная среда.....	14
1.1.2 Редкоземельные элементы и лантаноиды.....	16
Сравнение.....	17
1.1.3. Висмут.....	19
1.1.4. Активные волоконные световоды, легированные редкоземельными металлами.....	20
Активные волоконные световоды и их разновидности.....	20
Устройства на основе активных волоконных световодов.....	21
1.1.5. Производство активных волоконных световодов.....	23
Производство заготовки.....	23
Вытяжка активного волоконного световода из заготовки.....	28
1.1.6. Контроль стеклянных образцов спектральными методами.....	30
Мониторинг параметров люминесценции.....	31
Рентгеновская спектроскопия.....	33
Спектрофотометрия.....	34
Масс-спектрометрия.....	34
1.2. Автоматизация и управление в контроле оптических элементов.....	35
1.2.1. Автоматизированные системы управления спектрофотометрии и рефлектометрии.....	36
1.2.2. Автоматизированные системы управления масс-спектрометрии	37
1.2.3. Автоматизированные системы управления эллипсометрии.....	38

1.2.4. Автоматизированные системы управления спектрофлуориметрии.....	39
1.2.5. Комбинированные системы контроля оптических параметров..	40
1.4. Краткие выводы по главе 1.....	41
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКАЧКИ-ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ.....	42
2.1. Цель моделирования, объекты-оригиналы.....	42
2.1.1. Цель моделирования.....	42
2.1.2. Объект-оригинал: заготовка активного волоконного световода.	42
2.1.3. Объект-оригинал: оптическая схема боковой накачки.....	43
2.1.4. Используемые в модели законы.....	44
2.2. Первичные оценки.....	44
2.2.1. Оценка поглощения света сердцевинной.....	45
2.2.2. Поглощение света сердцевинной при продольной засветке.....	46
2.2.3. Дифракционное уширение пучка.....	46
2.2.4. Освещение сердцевины.....	48
2.2.5. Коэффициент пропускания.....	50
2.2.6. Расчёт интенсивности пучка у сердцевины.....	51
2.3. Модель накачки-люминесценции.....	51
2.3.1. Кинетические уравнения энергетических переходов.....	51
2.3.3. Вывод динамического уравнения концентрации ионов в возбуждённом состоянии.....	52
Общее решение.....	53
Включение диода.....	54
Стационарный режим.....	55
Выключение диода.....	56
2.3.4. Интенсивность люминесценции.....	57
2.4. Верификация модели.....	58

2.4.1. Экспериментальная установка.....	58
2.4.2. Методика определения времени жизни ионов эрбия в возбуждённом состоянии.....	59
2.4.1. Результаты и обсуждение.....	61
2.5. Программная реализация модели.....	62
2.6. Краткие выводы по главе 2.....	63
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗАГОТОВОК АКТИВНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ.....	64
3.1. Методика измерения концентрации активной примеси.....	64
3.1.1. Обоснование выбора методики.....	64
3.1.2. Тестирование выбранной методики.....	65
Тестовый стенд, реализующий выбранную методику.....	65
Результаты тестирования выбранной методики.....	67
3.2. Метод управления технологическим процессом изготовления заготовок активных волоконных световодов.....	69
3.2.1. Компенсация изменений мощности диода с помощью фотоприёмника-эталона.....	69
Дрейф спектральных характеристик диода накачки.....	69
Фотоприёмник-эталон в составе автоматизированной системы	71
Тестирование фотоприёмника-эталона.....	72
Обратно рассеянное излучение от поверхности заготовки.....	73
3.2.2. Масштабирование измерений с помощью заготовки-эталона....	75
Измерение концентрации.....	75
Заготовка-эталон в составе автоматизированной системы.....	75
3.2.3. Метод управления.....	77
3.3. Автоматизированная система исследования однородности концентрации активной примеси вдоль заготовки волоконного световода.....	80
3.3.1. Техническое исполнение.....	80

3.3.2. Система управления.....	83
3.3.3. Алгоритм измерений концентрации активной примеси.....	84
3.3.4. Программное обеспечение.....	85
3.4. Автоматизированная система научных исследований профиля концентрации заготовки.....	86
3.4.1. Алгоритм измерений.....	86
3.4.3. Программное обеспечение (режим измерений).....	88
3.5. Краткие выводы по главе 3.....	88
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИСПЫТАНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ.....	89
4.1. Адекватность получаемых результатов.....	89
4.2. Измерение распределения концентрации активной примеси в стандартном режиме.....	90
4.3. Томографические измерения распределения концентрации активной примеси в осевых сечениях заготовки.....	91
4.4. Внедрение.....	92
4.5. Краткие выводы по главе 4.....	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	94
Список сокращений и условных обозначений.....	95
Список литературы.....	96
Приложение 1. Листинг ключевых фрагментов разработанных программ для ЭВМ	115
Листинг ключевых фрагментов программы для ЭВМ erbiumCalc (MainForm.cs).....	115
Листинг ключевых фрагментов программы для ЭВМ ErGO System (Device.cs).....	120
Приложение 2. Структура генерируемых программой ErGO System файлов.....	122
Пример содержания файла измерений.....	122
Пример содержания файла калибровки.....	123

Приложение 3. Акты во внедрении результатов диссертационной работы.....	124
Акт внедрения в производственный процесс.....	124
Акт внедрения в научно-исследовательский процесс.....	125
Акт внедрения в образовательный процесс.....	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Для производства активных волоконных световодов в настоящее время используются методы парофазного осаждения, в частности, метод модифицированного химического парофазного осаждения. В последнем парогазовая смесь испытывает химическую реакцию внутри кварцевой трубы в условиях искусственного нагрева. После этого происходит образование стеклообразующей воздушной смеси, которая десублимируется на стенках. Послойное осаждение динамически регулируемой по составу смеси даёт возможность устанавливать физические параметры такой цилиндрической заготовки от внутренней поверхности трубы к сердцевине.

Дальнейшие этапы производства представляют собой промежуточный контроль и процесс вытяжки, в результате которой формируется новая структура — волоконный световод, повторяющий в меньшем масштабе привнесённые на этапе осаждения свойства.

Добавление в реагирующую газовую смесь дорогостоящих оптически активных соединений, содержащих ионы переходных или редкоземельных металлов, во многих случаях позволяет привнести в оптическую среду люминесцентные свойства. Такому качеству сопутствует возможность использования подобных световодов как лазерной среды. Последние находят применение в волоконных усилителях и лазерах.

Однако качество продукта может понизиться ещё на этапе производства заготовки ввиду сложности контроля осаждения со стороны аппаратуры и влияния человеческого фактора. В свою очередь, процесс промежуточного контроля выявляет геометрические параметры и оптические свойства заготовки как пассивной среды. Однородность же осаждённой активной примеси как один из важных критериев оценки качества отсутствует.

Следовательно, **актуальной** является разработка автоматизированной

системы управления технологическим процессом контроля однородности концентрации активной легирующей примеси вдоль длины заготовки в условиях растущей потребности серийного производства активных волоконных световодов, позволяющей оперативно прогнозировать выходные параметры продукта и более эффективно отбраковывать некондицию с сопутствующим удешевлением производства.

Степень проработанности темы.

Вопросы производства и качества активных волоконных световодов рассматриваются в работах Е. М. Дианова, А. С. Куркова, С. Л. Семёнова, J.-F. Luri. Контроль концентрации ионов эрбия в кварцевом стекле неразрушающим люминесцентным методом рассматривается в работах B. Julsgaard, F. Sidiroglou и M. Vivona.

Проблемы автоматизации контроля оптических параметров методами спектрофотометрии обсуждаются в работах Б. И. Деулина, А. И. Ларионова, Т. О. Зинченко, А. А. Галузы и A. Chopard рефлектometрии — А. И. Кривошеева и Ю. А. Константинова, масс-спектрометрии — Н. Е. Waldenmaier и Y. V. Zhang.

Вопросам автоматизации контроля оптических параметров неспектрометрическими методами посвящены публикации M. Horiguchi, S. K. Bhadra и B. L. Vachim.

Объект исследования — процесс изготовления заготовок активных волоконных световодов.

Предмет исследования — модель, методы и системы автоматизации контроля процесса изготовления заготовок активных волоконных световодов.

Цель работы — разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом контроля параметров заготовок активных волоконных световодов с учётом различных диаметров поверхностей измеряемых объектов, малого размера сердцевины и её возможным расхождением с геометрической осью заготовки, что уменьшит затраты на ранних стадиях

производства за счёт своевременной отбраковки некондиционных заготовок.

Поставленная цель определяет необходимость решения следующих **задач**:

1. Разработать комплексную математическую модель формирования излучения люминесценции в сердцевине цилиндрической стеклянной заготовки, учитывающую её геометрические и оптические параметры, и экспериментально верифицировать её.

2. На основе предложенной математической модели и экспериментальных исследований получить новые закономерности, характерные для цилиндрической заготовки, люминесцирующей в условиях боковой накачки.

3. Разработать метод управления технологическим процессом изготовления активных волоконных световодов, основанный на расчётах компенсации возмущений, вносимых множеством факторов, путём проведения эталонных измерений на основе полученных теоретических и экспериментальных закономерностей.

4. Разработать аппаратное и программное обеспечения автоматизированной системы управления технологическим процессом контроля однородности концентрации активной легирующей примеси в оптических заготовках, не требующей использования специальной иммерсионной жидкости.

5. Создать автоматизированную систему научных исследований, позволяющую повысить точность исследования распределения активных ионов в двумерном режиме путём тонкой подстройки оптомеханической схемы.

Методологическую основу исследований составляют методы теории автоматического управления, методы фотометрии, а также методы математического моделирования.

Научная новизна работы раскрывается в следующем:

1. Впервые построена математическая модель люминесценции сердцевины заготовки активного волоконного световода в оптической схеме, отличающейся от существующих наличием боковой накачки и отсутствием специальной

иммерсионной среды, что позволило выявить закономерности для измерения концентрации активной примеси;

2. Впервые предложен метод управления технологическим процессом изготовления активных волоконных световодов в составе разработанных автоматизированных систем, оригинальность которого заключается в возможности измерения концентрации активной примеси в сердцевине заготовки волоконного световода в условиях меняющихся оптических характеристик диода накачки, что позволило повысить качество отбраковки изделий;

3. Разработаны архитектура и алгоритмы функционирования предложенной автоматизированной системы контроля параметров распределения активной легирующей примеси, отличиями которой являются отсутствие специальной иммерсионной среды и неразрушение кристаллической решётки материала, что позволило повысить качество производимого изделия;

4. На основе предложенной архитектуры разработана методика оценки качества изготовления активных световодов в созданной автоматизированной системе научных исследований, особенностью которой является томографическое измерение концентрации активной примеси в осевых сечениях заготовки, что дало возможность изучения структуры осаждённого слоя.

Достоверность результатов основывается на законах геометрической и квантовой оптики, сопоставлении измеренных параметров активных ионов в волоконных световодах с данными литературных источников. Достоверность также подтверждается сравнением результатов измерений на разработанной автоматизированной системе контроля параметров заготовок активных волоконных световодов и сертифицированном комплексе, реализующем разрушающий структуру стекла рентгеноскопический метод.

Практическая значимость работы состоит в возможности адекватной оценки процесса изготовления заготовок активных волоконных световодов, а также в своевременной отбраковке заготовок ненадлежащего качества, которая

значительно удешевляет производство.

Представленная автоматизированная система позволила вдвое повысить точность определения редкоземельных металлов в составах сердцевин преформ. Также минимум на порядок повысилось пространственное разрешение по сравнению с использовавшимся до этого методом.

Применение разработок удешевило производство на стадии отработки технологии на 29% , в ходе серийного изготовления продукции — на 6% .

Теоретическая значимость работы заключается в создании научно-методической основы для построения адекватных математических моделей реализации метода люминесцентной фотометрии, что позволяет создать эффективный метод управления технологическим процессом контроля активной примеси в заготовках волоконных световодов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса формирования люминесценции в оптомеханическом комплексе автоматизированной системы и измеряемой заготовки. (п. 4 паспорта специальности)

2. Метод управления технологическим процессом изготовления активных волоконных световодов на основе расчётов локальной концентрации активных ионов и компенсаций вносимых в измерения искажений. (п. 4 паспорта специальности)

3. Автоматизированная система управления контролем однородности концентрации активной примеси в заготовках волоконных световодов. (п. 2 паспорта специальности)

4. Автоматизированная система научных исследований оптических и геометрических свойств эрбиевой сердцевинной заготовки волоконного световода. (п. 18 паспорта специальности)

Связь с государственными научными программами. Часть работы выполнена в рамках Государственного задания № АААА-А19-119042590085-2.

Апробация работы.

Результаты исследований докладывались на следующих научных мероприятиях:

— Международная конференция «Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика», Пермь, 2020;

— Международная конференция «Graphicon-2017», Пермь, 2017;

— Международная конференция «Оптические технологии в коммуникациях», Самара, 2016;

— «Всероссийская конференция по волоконной оптике», Пермь, 2015;

— Всероссийский «6-й семинар по волоконным лазерам», Новосибирск 2014;

— Всероссийская конференция «Мир фотоники», Пермь 2014.

Результаты диссертационной работы отражены в 2 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ. Написание программного обеспечения производилось на языках C#, C.

Результаты исследований внедрены в производственный процесс ПАО «Пермской научно-производственной приборостроительной компании», исследовательский процесс Лаборатории фотоники Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН и образовательный процесс ФГАОУ ВО Пермского национального исследовательского политехнического университета. Об этом свидетельствуют акты о внедрении каждой из указанных организаций.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 21 научных работах, в том числе 7 работ в изданиях, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание учёной степени, или включённых в базы цитирования Web of Science, Scopus, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Представленная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка (132 наименования) и 3 приложений. Общий объём диссертации составляет 126 страниц, в том числе 36 рисунков, 2 таблицы.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ

В данной главе будет проведён обзор по имеющейся на сегодняшний день литературе, которая так или иначе описывает схожие с предложенными в работе измерения и автоматизированные/автоматические установки, реализующие в работе такой анализ:

— Редкоземельные элементы и их применение в волоконной лазерной технике (1 параграф);

— Измерение параметров активных волоконных световодов и их заготовок, в том числе концентрации активной примеси (2 параграф);

— Измерение параметров материалов с помощью анализа люминесценции основного вещества или входящих в состав примесей (3 параграф);

— Измерение параметров активных волоконных световодов и их заготовок, в том числе концентрации активной примеси, с помощью анализа люминесценции основного вещества или входящих в состав примесей (4 параграф);

Стоит напомнить, что основным предметом диссертации являются активные волоконные световоды и их заготовки, потому другие специальные волокна и пассивные будут упоминаться в случае важности метода их анализа в контексте данного исследования.

1.1. Физические и технологические проблемы разработки и создания активных волоконных световодов

1.1.1. Активная среда

Люминесценция — явление, отличное от теплового излучения, заключающееся в поглощении материалом энергии и последующем свечении. Данный эффект лежит в основе всех лазеров и оптических усилителей, для

реализации которого требуется активная среда. Из-за множества способов передачи энергии таким материалам так называемые виды накачки также различны. Однако, стоит заметить, что в волоконной оптике, речь о которой будет идти в данной работе, преимущественно используется оптическая накачка (фотолюминесценция и её подвид, флуоресценция). По этой причине на ней и будет акцентироваться внимание. Существует две схемы накачки активных материалов: трёхуровневая и четырёхуровневая (см. рисунок 1).

В первой накачка переводит электрон в возбуждённое состояние, откуда он переходит в состояние 3, испуская фотон, которое из-за относительно большого времени жизни электрона на нём называется метастабильным уровнем. Переход на основной уровень в таких системах сопровождается испусканием фотона, что и есть проявление люминесценции. Наличие метастабильного уровня даёт возможность запасать в таких материалах энергию без её моментального излучения посредством спонтанной эмиссии.

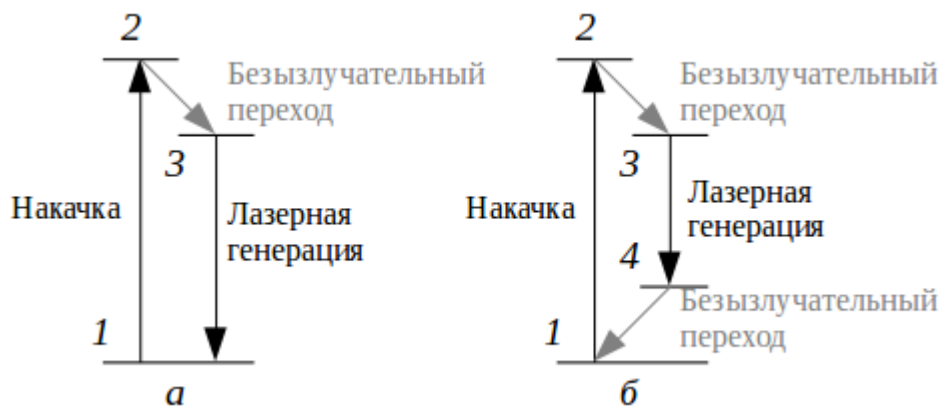


Рисунок 1. Электронные схемы накачки активных сред. а - трёхуровневая, б — четырёхуровневая

Четырёхуровневая схема отличается лишь наличием дополнительного безызлучательного перехода, где излучение фотона сопровождается изменением состояния электрона от метастабильного уровня к промежуточному.

В волоконной оптике первостепенную важность имеет величина поглощения излучения в волокне, которая определяется множеством факторов. В

кварцевых волокнах она минимальна в так называемых окнах прозрачности волокна, которые попадают в следующие длины волн: 830 нм , 1310 нм , 1550 нм . Под критерии таких лазерных материалов, накачка и люминесценция в которых возможно на длинах волн совпадающих или близких к окнам прозрачности, попадают стёкла с добавлением редкоземельных металлов [92].

1.1.2 Редкоземельные элементы и лантаноиды

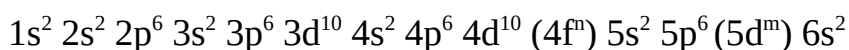
Редкоземельные элементы (РЗЭ) — группа из 17 химических элементов, которые имеют подобные друг другу химические свойства, объединяющая в себе скандий (Sc), иттрий (Y), лантан (La), церий (Ce), празеодим (Pr), неодим (Nd), прометий (Pm), самарий (Sm), европий (Eu), гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho), эрбий (Er), тулий (Tm), иттербий (Yb), лютеций (Lu). Эти по своей природе металлы сгруппированы из-за схожих химических свойств, обусловленных наиболее характерной степенью окисления, 3+.

Этимология наименования напрямую связана с малой распространённостью этих металлов в земной коре со средним содержанием (кларковое число) 0,0146–0,0158% [122]. А быстро растущий спрос формируется такими высокотехнологичными сферами, как создание сверхсильных постоянных магнитов, полупроводниковых [7], сверхпроводниковых и лазерных материалов [15], ядерная энергетика, диодных экранах [56] и др., который не может быть в полной степени быть удовлетворён предложением, что усугубляется доминирующим положением КНР (95% мировой добычи РЗЭ на 2008 г.). По этим причинам сырьё как в виде чистых металлов, так и в виде химических соединений, имеет высокую стоимость. Основные минералы, из которых получают РЗЭ — бастнезит (более 80% всего добываемого сырья) и монацит, однако в последние года наблюдается тенденция отказа от добычи первого из-за содержания радиоактивного тория [123][128][132].

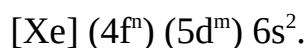
Лантаноиды, в свою очередь, группа элементов, в которой по мере

увеличения атомного номера, от церия до лютеция, заполняется главным образом электронная оболочка $4f$ [13][66]. Именно лантаноиды используются при создании лазерных материалов (в том числе, для волоконных лазеров), благодаря наличию электронных переходов на f -орбиталях, многие из которых соответствуют ближней и средней инфракрасным (ИК) областям [132].

Общее для лантаноидов строение электронных оболочек:



или



При ионизации такие атомы теряют электроны с $5d$ и $6s$ валентных оболочек, играющих экранирующую роль, и, как правило, один электрон с $4f$ оболочки, что позволяет проявиться указанным люминесцентным свойствам.

В подавляющем большинстве используются стёкла [24] с оксидом лантаноидов (TR_2O_3) в составе, но в некоторых случаях, как, например, в составе фторид-оксидной стеклокерамики в качестве окислителя может выступать фтор [3][79][131]. Также эрбий может быть ионизирован, будучи в составе псевдоаморфных плёнок GaN, и люминесцировать под действием излучения с длиной волны 327 нм [90].

Стекла, включающие в свою структуру такие элементы (в первую очередь, Er, Yb, Ho, Tm, Nb) в виде ионов (Er^{3+} , Yb^{3+} , Ho^{3+} , Tm^{3+} , Nb^{3+}), и оптические световоды на их основе, будут упоминаться непосредственно в данной работе. Учитывая этот факт, понятия лантаноиды и редкоземельные металлы могут в дальнейшем использоваться равноценно.

Сравнение

Ниже представлена сравнительная таблица (см. таблицу 1) характеристик упомянутых выше ионов лантаноидов с точки зрения спектроскопии [7][13][16][37][75][107][115].

Упомянутые здесь же ur -конверсионные переходы (антистокс люминесценция) являются дополнительными спектральными линиями, имеющими место быть благодаря разрешенным электронным переходам на более высокие уровни, иногда с сопровождением безызлучательных переходов. Зачастую они являются неизбежными и незначительно понижают эффективность генерации основной линии.

Стоит отметить, что иногда Er и Yb используются вкуче для повышения эффективности поглощения накачки [3][31][32][108]. Здесь Yb выступает в роли сенсбилизатора, поглощая излучение, а затем передавая энергию ионам Er . Однако при больших мощностях накачки такие световоды могут нагреваться [99], что может повлиять на люминесцентные свойства эрбия [88]. Более того, качество передачи энергии от иона к иону сильно зависит от процесса производства [121].

Таблица 1 — Сравнительная таблица основных спектроскопических характеристик некоторых лантаноидов

	Полоса накачки	Полоса люминесценции	Время жизни в возбуждённом состоянии
1	2	3	4
Er^{3+}	980 нм (${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$)	1480-1590 нм (${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) 550 нм (${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) [Ur-конверсия] 660 нм (${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) [Ur-конверсия]	10-12 мс (${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$)

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Yb ³⁺	915 нм, 976 нм (² F _{7/2} → ² F _{5/2}) [Два пика поглощения]	978-982 нм, 1030-1040 нм (² F _{5/2} → ² F _{7/2}) [Два пика люминесценции]	0.8 мс (² F _{5/2} → ² F _{7/2})
Ho ³⁺	900 нм (⁵ J ₈ → ⁵ J ₅) [Слабо проявлена] 1150 нм (⁵ J ₈ → ⁵ J ₆)	1900-2100 нм (⁵ J ₇ → ⁵ J ₈)	0.5 мс (⁵ J ₇ → ⁵ J ₈)
Tm ³⁺	790 нм (³ H ₆ → ³ F ₄) 1060-1250 нм (³ H ₆ → ³ H ₅)	1700-1900 нм (³ H ₄ → ³ H ₆) 480 нм (¹ G ₄ → ³ H ₆) [Ур-конверсия] 670 нм (¹ G ₄ → ³ H ₄) [Ур-конверсия]	0.2 мс (³ H ₄ → ³ H ₆)
Nd ³⁺	800 нм (⁴ I _{9/2} → ⁴ F _{5/2})	920-940 нм (² F _{3/2} → ⁴ I _{9/2}) [Слабо проявлена] 1050-1100 нм (² F _{3/2} → ⁴ I _{11/2}) 1340 нм (⁴ F _{3/2} → ⁴ I _{13/2}) [Слабо проявлена]	0.5 мс (² F _{3/2} → ⁴ I _{11/2})

1.1.3. Висмут

В последние года активно ведутся исследования (ИЦВО РАН) по применению металла висмута (Bi) в качестве легирующей примеси взамен эрбия. Как и у эрбия, ионы висмута обладают линией люминесценции в ближнем ИК, однако диапазон более широкий, 1000–1600 нм. Изменение состава стекла позволяет менять ширину линию люминесценции и её центральную длину волны [105].

Не смотря на привлекательность подобных волокон, исследования в этом направлении до сих пор ведутся, и на данный момент висмут не может вытеснить

эрбий на мировом рынке, что вероятно связано с сильной зависимостью спектров поглощения и люминесценции от состава стекла.

1.1.4. Активные волоконные световоды, легированные редкоземельными металлами

Активные волоконные световоды и их разновидности

Как было сказано выше, лантаноиды, в частности, эрбий, иттербий, гольмий, тулий и неодим, используются как примеси для создания активной среды в кварцевых волоконных световодах. Использование их (элементов) по отдельности или в совокупности даёт возможность создавать лазеры и усилители с нужными характеристиками.

Такие волоконные световоды относятся к группе специальных, имеющих нестандартное применение при сравнении с пассивными волокнами, и именуются активными. Последние имеют также различные конструкции, заточенные под достижение определённых характеристик лазера или усилителя.

В основе конструкции любого типа активных волоконных световодов лежит использование явления полного внутреннего отражения, когда цилиндрическая сердцевина имеет показатель преломления заведомо выше оболочки, а, следовательно, свет распространяемый вдоль оси указанного цилиндра может лишь отразиться от границы раздела сред, но не преломиться.

Простейшая конструкция [62] включает в себя одну сердцевину, где распространяется и излучение накачки, и излучение люминесценции. Отличие в таком случае от стандартного телекоммуникационного оптического волокна (SMF-28) заключается в наличии примеси в сердцевине. Накачка может вводиться как через торец волокна, так и через V-образные канавки на кварцевой оболочке волокна или боковую поверхность [97].

Более сложные конструкции, как, например, световоды с многоэлементной

первой оболочкой (МПО-/GTWave-световоды) используют одновременно три сердцевинки [120], имеющие общую оболочку и контакт друг с другом, что позволяет излучению накачки в двух пассивных световодах накачивать сигнальный (активный) световод [97].

Ещё одна реализация подразумевает распространение излучения в оболочке, когда пропускание и усиление сигнала происходит в сердцевине, однако такая система требует более сложных спектральных разветвителей [32].

Существует множество схожих по принципу конструкций с последней активных волокон, однако в контексте данной работы будет рассматриваться самая простая реализация, рассматриваемая в данных исследованиях.

Устройства на основе активных волоконных световодов

Как было сказано выше, люминесцентные свойства активных волокон используются в волоконных лазерах [2] и усилителях. Далее кратко будут описаны принципы действия этих устройств.

Волоконные усилители. Главной задачей усилителя является увеличение мощности сигнала на конкретной длине волны посредством ввода излучения накачки. Основным параметр в данном случае — усиление, которое традиционно измеряется в децибелах (дБ):

$$Ampl(\text{дБ}) = 10 \cdot \log_{10} \frac{P}{P_0} ,$$

где P — мощность выходного излучения сигнала, P_0 — входного. Интересно, что указанная формула используется для расчёта и других относительных величин в оптике, в том числе мощности излучения при опорной мощности $P_0 = 1 \text{ мВт}$: такая величина называется дБм .

В простейшем эрбиевом усилителе [70] входной сигнал усиливается посредством явления вынужденного излучения. Здесь активное волокно накачивается полупроводниковыми лазерными диодами (LD).

Такие усилители находят применение в телекоммуникациях [57][59] и распределённых волоконно-оптических датчиках [1][20][36][54][77][84].

Некоторые усилители используются, например, для усиления ультракоротких чирпированных импульсов [60] и других задач, выходящих за рамки упомянутых сфер использования.

Волоконные лазеры [74][104]. Как и в объёмной оптике, для получения когерентного монохроматического поляризованного излучения в волоконной используют лазеры. Их отличительная черта — наличие резонатора, позволяющего выделиться одному устойчивому состоянию излучения, моде. Такое возможно реализовать благодаря брегговским решеткам, структурам с продольно (для оси распространения излучения) периодичной структурой показателя преломления, играющим роль спектрально селективных зеркал (отражают конкретную длину волны за счёт соблюдения условия Вульфа-Брегга при нормальном падении излучения). Иногда для создания резонатора достаточно скола волокна, где отражение обеспечено отражением Френеля на границе раздела сред стекло-воздух.

В источнике [97] представлена схема лазера, где между брегговскими решетками образуется резонатор. В зависимости от легирующих ионов к накачке будут предъявлены соответствующие требования, а в зависимости от параметров решёток — параметры выходного лазерного излучения. В некоторых случаях линию излучения можно менять с помощью нагрева активной среды [43].

Одним из самых перспективных направлений в использовании лазеров является медицина [64]. Лазерное излучение прижигает надрез, что уменьшает хирургическую травму. В свою очередь, компактное исполнение системы подвода излучения к ткани может повлиять на успех операции.

Также такие волоконные световоды используются для создания суперлюминесцентных источников ИК излучения, где необходимо достижение широкой полосы излучения [5][49][53][55][85]. Так, усилители на активных

волокнах необходимы для создания зондирующих и накачивающих сигналах в бриллюэновской рефлектометрии и бриллюэновском анализе [17][30][47][65][83]. В распределённых акустических датчиках также используются усилители слабых компонент рассеяния, что увеличивает чувствительную часть волоконного световода [6][22][51][77][86]. Кроме того, невозможно представить многие оптические рефлектометры частотной области, обладающие сверхвысоким разрешением без использования в них волоконных усилителей [9].

В литературе [34] также можно встретить применение активных волоконных световодов в качестве чувствительного элемента датчика температуры. Автор использовал зависимость спектральных характеристик (спектр люминесценции и спектр поглощения) от температуры, что дало точность порядка 0.007°C .

1.1.5. Производство активных волоконных световодов

Производство активных волоконных световодов подобно производству обычных, пассивных, и относится к разряду нанотехнологий, и его можно разделить на два больших этапа: производство заготовки (преформы) и вытяжка световода из заготовки — которые будут рассмотрены далее.

Производство заготовки

Процесс создания заготовки является основополагающим при производстве, т. к. именно в этот момент в заготовке формируются требуемые качества будущего волокна.

Главными используемыми технологиями здесь являются методы внутреннего химического парофазного осаждения MCVD/FCVD [21][61][80][92][124]. Через чистую кварцевую трубу проходит паро-газовая смесь, в которой происходит химическая реакция под действием высоких температур, реализуемых $\text{O}_2\text{-H}_2$ -горелкой (MCVD) или печью (FCVD) [52]. В последние десять лет также

активно развивается нагрев паро-газовой смеси посредством плазмы (PCVD), что дает более точный контроль показателя преломления осаждаемой примеси, лучшей равномерности осаждения продуктов реакции и уменьшение OH-групп в составе получаемого стекла [69].

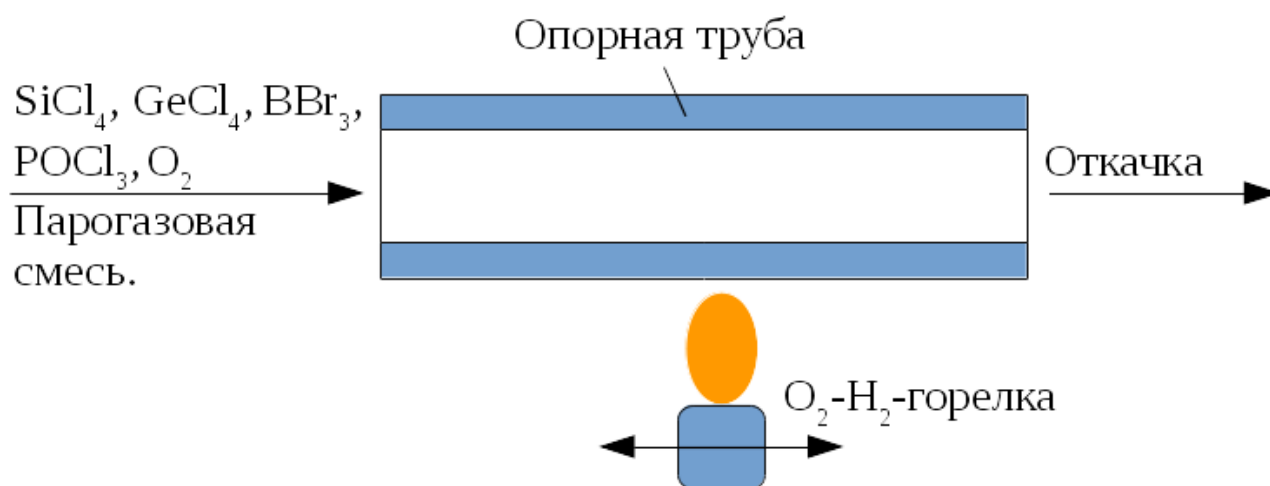
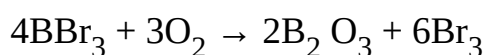
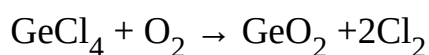
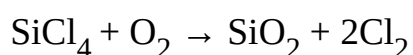
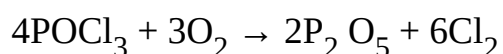


Рисунок 2 — Принципиальная схема MCVD-процесса создания заготовки волоконного световода.

На рисунке 2 проиллюстрирована принципиальная схема MCVD процесса. В процессе прохода через полую трубу парогазовая смесь начинает реагировать, в результате чего образуются стеклообразующие материалы, как правило: SiO₂, GeO₂, B₂O₃, P₂O₅. Осаждаясь на трубе, они постепенно создают структуру стекла, меняющуюся от внешнего радиуса к центру. Во избежание прогиба трубы (впоследствии — заготовки) происходит вращение вокруг оси. Градиент свойств материала возможен благодаря смене состава парогазовой смеси во времени. Химические формулы реакций внутри трубы следующие:





При необходимости легировать стекло какими-либо элементами в парогазовую смесь добавляют их соединения или оксиды [124]. По окончании процесса происходит схлопывание опорной трубки в заготовку под действием сил поверхностного натяжения при температуре 2000°C , когда оставшееся отверстие в трубе устраняется. Стоит заметить, что схлопывание может приводить к резкому падению показателя преломления в сердцевине из-за другого количества напряжений в стекле и состава, что связано перераспределением концентрации Ge.

Однако ещё стоит учесть, что локализация химической реакции является сложной аэродинамической и термодинамической задачей. В результате сложности контроля этого процесса наиболее вероятно неоднородное распределение элементов вдоль длины, а также основных параметров заготовки, длины волны отсечки, апертуры и т. д. Добавляет сложности ещё и способность ионов лантаноидов к кластеризации, образованию структур со связью TR-TR, неспособных люминесцировать, что может потребовать дополнительного контроля световода [91][95][94].

Уже на этом этапе можно осуществлять контроль параметров заготовки, например, её размеров [41][114].

Более сложные методы, внешнего парофазного осаждения зачастую лишены данных недостатков. К ним относятся внешнее парофазное осаждение (OVD), осевое парофазное осаждение (VAD), а также внешнее плазменное парофазное осаждение (POVD) [96].

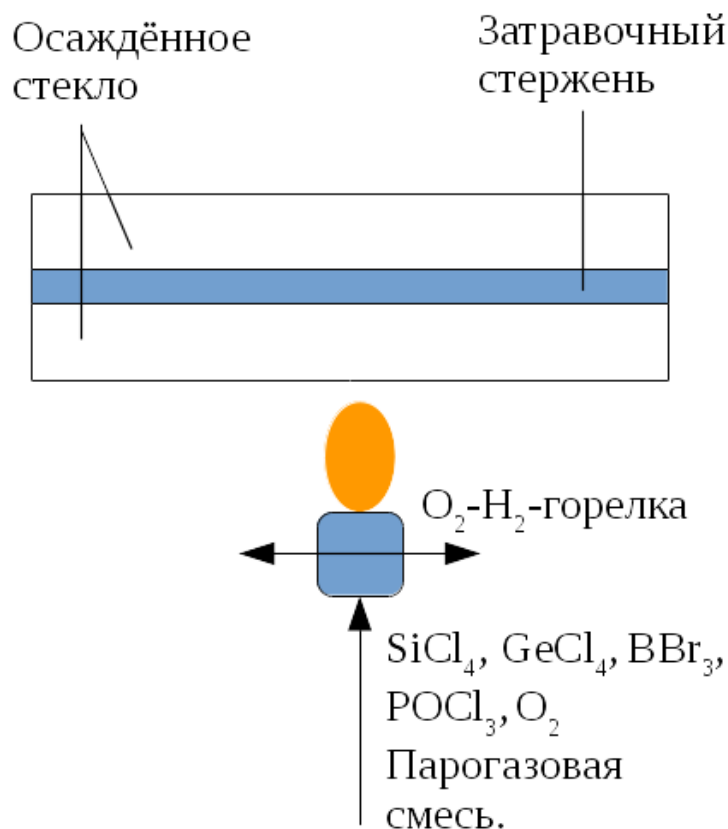


Рисунок 3 — Принципиальная схема производства заготовок волоконных световодов OVD (внешнее паровозное осаждение)

Например, в технологии OVD осаждение стеклобразующих материалов происходит на многоразовом затравочном стержне (см. рисунок 3). Также, как и для MCVD, существует модификация с плазменной мечи как нагревающего элемента (POVD). В свою очередь, на рисунке 4 проиллюстрирован метод VAD (осевой), где осаждение происходит на затравочном стержне, а осаждение на его торце (впоследствии — на осаждённых ранее слоях). Достоинством осевого метода является возможность создания заготовок любой длины, т. к. нет зависимости от длины затравочного стержня или трубы. Сложность его в том, что регуляция профиля показателя преломления, как и самого стекла в целом, достаточно непроста в реализации и требует тщательной отладки производственного процесса.

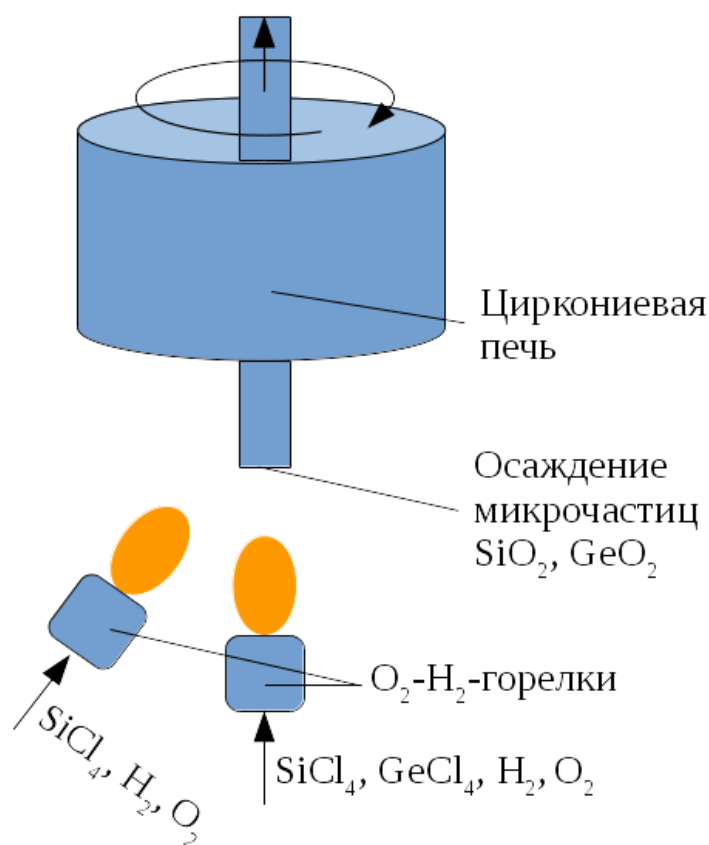


Рисунок 4 — Принципиальная схема производства заготовок волоконных световодов VAD (внешнее осевое парофазное осаждение)

На данный момент развивается новый метод производства заготовок методом пропитки [англ. solution] пористого слоя стекла из раствора или из парофазной смеси.

Первая, из жидкой фазы, предполагает создание на станке MCVD предварительной заготовки. Последние слои делают при низких температурах, чтобы образовался пористый слой. Затем заготовки погружают на 1 час в водный раствор требуемой примеси, где пористый слой и пропитывается. Затем трубу промывают ацетоном для избавления от воды, помещают на станок MCVD и продувается Cl_2 при температуре 600°C . Затем основной слой спекается и заготовка проходит следующие этапы производства, как и после MCVD процесса [39][80].

Также предложено осаждение из парогазовой смеси как модификация MCVD. В данном случае процесс осаждения стеклообразующих материалов и легирующей примеси (трис(дипивалоилметанат) эрбия) разделены во времени. Таким образом поверхность осаждённых слоёв пропитывается оксидом эрбия и сплавляется в прозрачное стекло [89].

Такая технология даёт возможность точно регулировать содержание примеси в заготовке. Более того, позволяет избегать связей между ионами эрбия и хлоридом алюминия. Метод пропитки активно используется для создания эрбиевых, радиационно стойких волокон, а также волокон в фазовым разделением [61].

Таким образом, можно свести существующие методы производства к следующей классификации.

Таблица 2 — Сравнительная таблица основных спектроскопических характеристик некоторых лантаноидов

Внутреннего осаждения	MCVD (кислородоводородная горелка)
	FCVD (печка)
	PCVD (плазменная печь)
	Метод пропитки (из раствора или из парогазовой смеси, вкупе с MCVD)
Внешнего осаждения	OVD (осаждение на стержне)
	VAD (осаждение на затравке)
	POVD (плазменная печь)

Вытяжка активного волоконного световода из заготовки

Последующий этап производства — вытяжка полученной заготовки [124]. Важно то, что данному процессу предшествует предварительная подготовка заготовки для получения волокна с нужными оптическими и геометрическими параметрами: жакетирование (уширение диаметра заготовки за счёт

дополнительной трубы), масштабирование (растягивание) и т. д.

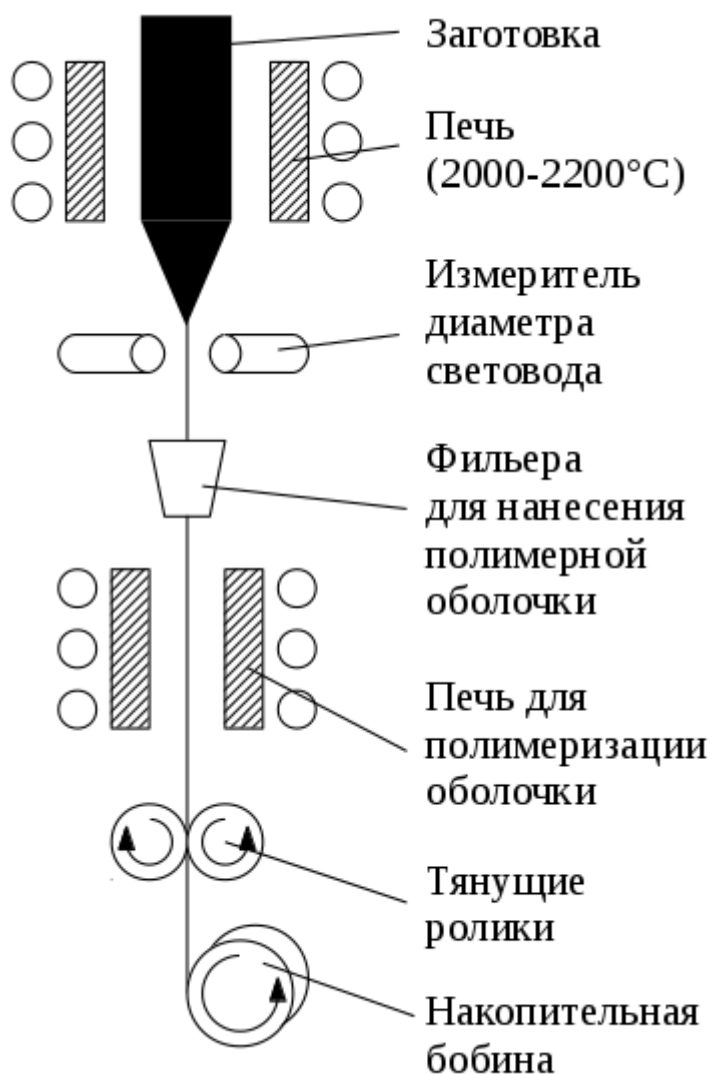


Рисунок 5 — Схема работы процесса вытяжки волоконного световода из оптической заготовки. Все параметры оптической заготовки вверху масштабируются в световоде внизу.

После этих этапов, если они необходимы, заготовка ставится в вертикальное положение и нагревается до температуры 2000–2200 °С после чего вязкость стекла постепенно понижается, что приводит к последующему стеканию

стекломассы вниз под действием силы притяжения, далее волокно «растягивается» до диаметра 100–900 мкм. Таким образом свойства заготовки переносятся на волоконный световод, результирующий стеклянный стержень, с учётом масштаба [21][125].

Не смотря на то, что главенствующие явления имеющие место быть термодинамические, есть высокий шанс ухудшения качества стекла из-за пыли в воздухе. Поэтому одно из главных требований к процессу вытяжки — высокочистое помещение. По чистоте оно должно превосходить даже помещения для размещения MCVD-станка. Более того, в зависимости от требуемого волокна количество этапов прохождения волокна через башню может увеличиться, что, в свою очередь, сделает ещё более дорогим этот процесс.

1.1.6. Контроль стеклянных образцов спектральными методами

Структура стекла по сути своей является резко охлаждённым раствором с высоким показателем вязкости. В таком случае в структуре стекла образуется кристаллическая решётка с ближним порядком.

Основными стеклообразующими соединениями являются SiO_2 и GeO_2 находящиеся в одной группе таблицы химических элементов, которые имеют по 4 связи и образуют пирамидообразные структуры, где соединения происходят через так называемые кислородные мостики. По этой причине материаловеды иногда для удобства понимания обозначают их $\text{SiO}_{4/2}$ и $\text{GeO}_{4/2}$, где 4/2 обозначает наличие 4 связей через кислород, который соединён химической связью с одновременно двумя атомами Si.

Как было описано выше, зачастую кислород как неметалл тянет на себя электронную плотность примесей, ионизируя их. Таким образом в атомах устраняются «экранирующие» внешние электроны, дающие возможность тем или иным электронным переходам, в т. ч. и лазерным.

Такая структура стекла, не смотря на её высоковязкое состояние и

химическую пассивность, может быть изменена под воздействием внешних электромагнитных волн преимущественно малых длин волн (УФ-волны, рентген, радиация). Фотоны высокой мощности способны менять химические связи, тем самым меняя и всю структуру стекла. Это может приводить как к изменению прочностных характеристик (прочность, хрупкость, твёрдость), так и к изменению оптических параметров (показатель преломления). За данную восприимчивость отвечает такой параметр как радиационная стойкость, а сами методики являются разрушающими, что значит невозможность использования образца стекла в дальнейшем.

По этой причине более выгодно использовать самые нейтральные для кварцевого стекла длины волн при измерении спектров: видимое излучение, ИК-диапазон. Однако важно отметить, что зачастую рентгеновская спектроскопия позволяет с высокой точностью определять состав стекла, т. к. фотоны данного излучения напрямую воздействуют на структуру материала, тогда как видимое/ИК-излучение, взаимодействует лишь с электронными оболочками элементов стекла, что даёт скорее косвенные результаты при замерах.

Мониторинг параметров люминесценции

Достаточно распространённым методом контроля посредством люминесценции в оптическом диапазоне (УФ, видимый, ИК) это спектроскопия. Суть её заключается в измерении оптической плотности материала на всём спектре. Благодаря наличию у примесей в структуре образца линий поглощения можно с точностью определить насколько сильно проявлена эта линия и оценить концентрацию самой примеси.

Например, в одной из рассмотренных работ [71][72] было предложено контролировать локализацию и концентрацию эрбия в волокне, заготовка которого производилась технологией MCVD, с помощью сканирующего микроскопа ближнего поля в условиях накачки волокна аргоновым лазером (488 нм).

Благодаря такой накачке происходил переход ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$ (488 нм), затем безызлучательный переход (или их ряд) с последующими возможными переходами с последующей люминесценцией: ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (520 нм) и ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (550 нм), зелёный цвет видимого спектра.

В другой работе [35] рассмотрен вариант контроля концентрации эрбия в силиконовых пленках также контролем люминесценции. В условиях освещения длиной волны 405 нм с достаточно высокой интенсивностью (10000 Вт/м²) ионы эрбия даёт люминесценцию в окрестности длины волны 1550 нм и ещё одну, достаточно широкую, в области 1100 нм . Именно эти линии и контролировались на экспериментальной установке с помощью двух монохроматоров разной чувствительности.

В работе Presby Н. М. [67] предложена неразрушающая методика контроля диаметра заготовки с помощью люминесценции заготовки в условиях излучения ртутной газоразрядной лампы. В дальнейшем автор анализирует люминесценцию с помощью видеокамеры. Такой подход дал 1% -ое расхождение с реальными измерениями. Главное преимущество методики заключается в отсутствии иммерсионной среды и контакта измерительной системы и заготовки.

Следующая статья [19] рассматривает относительно «простой» способ контроля ионов Eu. В качестве чувствительного элемента использовался смартфон. Не смотря на перспективность работы, разные камеры смартфонов не смогут дать повторяемость необходимую для серийного производства.

Работа Vivona М. [81] более других ориентирована на измерение заготовок активных волоконных световодов. При размещении заготовки активного волоконного световода в специальной камере с иммерсионной жидкостью автору удалось осветить сердцевину излучением накачки и одновременно с этим измерить мощность люминесценции. Помимо использования иммерсионной жидкости, можно выделить следующий минус: в системе отсутствует позиционирование оптических элементов. Это может привести к неточности

измерения концентрации при несовпадении центра пучка излучения накачки с сердцевинной.

Рентгеновская спектроскопия

Одно из похожих измерений было представлено в ранее упомянутой работе [61]: на рисунке 17 проиллюстрирована фотография с эмиссионного сканирующего электронного микроскопа посредством технологии энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Пучок электронов в данном приборе возбуждает атомы образца, которые имеют свой характерный спектр в рентгеновской области. На рисунке слева и справа показаны два подобных спектра, где каждому пику напрямую соответствует наличие того или иного атома/иона в структуре стекла.

Похожие система предложена в работе [58]. Рентгенофлуоресцентная спектроскопия с дисперсией по длине волны, предназначенная для измерения линий в диапазоне 4,5–7 кэВ, дала чувствительность уровня 1 ppm.

Микронд, работающий на явлении рентгеновской эмиссии, сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией, рассмотрен в работе W.-S. Liu [50]. Исследование проводилось на предмет P3Э, Al и Si в папоротнике *Dicranopteris Linearis*. Разработанная авторами методика нуждается в верификации посредством сертифицированного средства измерения.

Подобный метод — рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, где получают на выходе уже электроны, выбитые с поверхности материала рентгеновским излучением. По количеству электронов разной кинетической энергии можно также количественно оценить состав поверхности образца [38].

Другой эффект, работающий с фотонами рентгеновской и гамма областях, эффект Оже. Суть его заключается в выбивании электрона со внутренних оболочек соответствующим фотоном. Образованная вакансия заполняется электроном с внешней оболочки, который соответственно передает энергию

другому электрону на внешней оболочке, который и вылетает за пределы атома, именуемый Оже электроном. Зная характерные энергии Оже электронов для конкретных атомов и контролируя их при таком облучении образца, можно получить достаточно полную картину о составе материала. Подобные измерения проводились в качестве исследований для стекол в следующих публикациях [10] [38].

Стоит отметить, что стекло, освещённое ранее рентгеновским излучением меняет свою структуру, что приводит к нежелательным последствиям, в том числе к увеличению хрупкости.

Спектрофотометрия

Метод спектрофотометрии — физико-химический метод, основанный на анализе спектров поглощения с последующим анализом составов образцов. Приборы реализующие этот метод называются спектрофотометрами. В отличие от предложенного в работе метода здесь используется поглощение как физическое явление, а не люминесценция.

В своей работе Свиначенко А. А. [76] исследует спектры иттербия и тулия. Расчёт спектров проводится с помощью релятивистской теории возмущений многих тел. Авторы представили точные значения параметров автоионизационных резонансов для изучаемых материалов, а после сравнили эти величины с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными.

Масс-спектрометрия

Метод масс-спектрометрии — физико-химический метод, использующий магнитное поле на потоке ионов от химических реакций; каждый исследуемый ион имеет свой удельный заряд и соответствующую траекторию движения в магнитном поле, на которой можно разместить детектор. Метод требует химическое разрушение среды.

Авторы [25] продемонстрировали определение редкоземельных металлов в рудах, добытых в северных районах Пакистана. Они показали применение спектроскопии лазерно-индуцированного пробоя и время пролетной масс-спектрометрии с лазерной абляцией для элементного анализа геологических образцов руд, содержащих РЗЭ. Метод (LIBS) продемонстрировал возможность обнаруживать примеси Ce, La и Nd. В качестве эталона использовались образцы чистых оксидов. Однако высокая стоимость и разрушение структуры материала не дают возможность его использовать в серийном производстве стеклянных образцов.

Один из путей развития метода LIBS представлен в работе Tian L. [78], где ключевым элементом являлись алгоритмы машинного обучения. Для трёх люминофоров (Gd, Yb, Y) использовался метод обратного распространения ошибки в нейронной сети. Результаты показали, что степень распознавания достиг 99,9% . Стоит заметить, что для реализации таких измерений требуется внушительный объём данных.

Например, в работе [63] рассматривается исследование окисленного графена и органических продуктов с помощью масс-спектрометрии индуктивно-связанной плазмы вкупе с другими физическими методами, что дало точность измерения редко-земельных ионов порядка 1 нг/л . Проблемой постановки такого эксперимента можно считать высокую стоимость оборудования и избыточность данных.

1.2. Автоматизация и управление в контроле оптических элементов

Прибор, разрабатываемый в рамках данной работы, является спектральным: на начальных этапах регистрировался непосредственно сам спектр, после — спектр интегрально на характерном для примесей диапазоне. По этой причине во внимание взяты работы по автоматизированным системам, реализующих спектральные методы.

1.2.1. Автоматизированные системы управления спектрофотометрии и рефлектометрии

Ряд работ Деулина Б. И. [103][102][101][100] рассматривают разработанные спектрофотометры для контроля химического состава воды. С точки зрения оптики в данных работах используется твердотельный лазер на красителях с распределённой обратной связью, что связано с минимизацией занимаемого объёма и отсутствием востребованности в интерферометрах. Более того, представленные схемы преимущественно двухлучевые: 50% светового потока падает на образец, остальная часть — на эталонный, по этой причине не требуются дополнительные движущиеся части системы переключения между двумя кюветами (образцы эталонный и исследуемый).

Важным является барабан, осуществляющий смену активных лазерных элементов и позволяющий менять диапазоны длин волн излучения. Смена происходит посредством шагового двигателя, подключённый к электромагнитному реле постоянного тока, получающему импульсы с генератора.

Ларионов А. И. [111][116] в своей работе рассматривает другую систему управления спектрофотометрическим оборудованием, где автор предлагает использовать для контроля спектра широкодиапазонный фотодиод, заменяющий два других возможных, способных по отдельности регистрировать излучения на двух диапазонах, что требует последующей сшивки.

Зинченко Т. О. в своей статье [110] предложил автоматизированную систему поворота с шаговыми двигателями для перестройки спектральных элементов (дифракционные решётки). Вкупе червячной передачи это помогло значительно увеличить точность выставления длин волн по сравнению с оборудованием на ручном управлении.

Главной составляющей аппаратной части является микросистема из двух ядер, выполняющие разные функции. Программа управления (программная часть), устанавливаемая на ПК, посредством USB интерфейса управляет

аппаратной частью.

Галуза А. А. [98] предложил широкодиапазонный прибор, использующий схему снижающую требования в стабильности базовых оптических элементов спектрофотометрии, источников и регистрации излучения. Реализовано это посредством исключения преломляющих элементов, призм, с заменой на зеркала: сферическое и плоское. Более того, автор предложил в схеме наличие двухканальной системы, которая была описана выше. Отличие здесь в том, что канал регистрации излучения с исследуемого образца включает в себя систему поворота. Благодаря ей можно измерять образец и на просвет (спектрофотометрия) и на отражение (рефлектометрия).

В статье [18] исследуется возможность использования микроскопии в отражённом свете для автоматической характеристики полиметаллических руд на предмет шести распространённых сульфидов. Измерение параметров проводилось на мультиспектральных изображениях путём определения порога серого цвета с помощью ПО Clemex Vision PE. Данное исследование является перспективным для исследования материалов на предмет сульфидов, однако не подходит для стёкол из-за разницы в структуре среды и ограниченного круга наблюдаемых прибором примесей.

Если рассматривать частный случай рефлектометрии, в исполнении волоконной оптики, то автоматизация этого промежуточного контроля рассмотрена в следующих работах [42][113][112]. Однако рефлектометрия обратного рассеяния в активной среде достаточно сложна для интерпретации, что может значительно увеличить дороговизну реализации системы контроля заготовок активных волоконных световодов.

1.2.2. Автоматизированные системы управления масс-спектрометрии

В работе [82] исследователи описывают автоматизированную систему, реализующую масс-спектрометрический метод для биотерапевтических

препаратов. Система включает в себя робототехнические элементы утилиты для работы с жидкостями и микропланшетами, встроенную систему спектрометрии, а также ПО для управления системой и выгрузки данных в облачное хранилище. Данная статья одна из немногих, где используется роботизированное управление автоматизированной системой оптических измерений. Однако проблемным аспектом для подобного анализа стеклянных образцов является неточное позиционирование образцов.

В своей обзорной статье Zhang Y. V. [87] рассмотрел тенденции в автоматизации процессе масс-спектрометрии. Автор отметил, что перед учёными стоят следующие большие задачи:

- 1) Необходимость увеличения времени смены образцов и сокращение времени ручной обработки.
- 2) Увеличение общей производительности.
- 3) Достижение полной автоматизации.

Это будет достигнуто, как отмечено в работе, автоматизацией подготовки образцов и анализа данных, интеграции с существующими автоматизированными платформами, бесперебойной связью с электронными системами посредством двунаправленного интерфейса.

Сегодня автоматизация может заключаться как в обработке данных [28], так и быть всесторонней.

1.2.3. Автоматизированные системы управления эллипсометрии

Эллипсометрия, методы, направленные на анализ исследуемых поверхностей на предмет их оптических свойств. Метод является оптическим и использует контроль степени и характера поляризации (s- и p-компоненты излучения)) после отражения от поверхности. Физической базой для данных методов является волновая физика (формулы Френеля). Эллипсометрия по своей сути не анализирует спектры, однако существует частный метод

спектроэллипсометрии, где поляризационное излучение, отражённой от поверхности, изучается на нескольких длинах волн.

Галуза А. А. [98] предложил в своей статье автоматизированный спектральный (криогенный) эллипсометр. С точки зрения конструкции, отличие от других подобных приборов заключается в наличии криостата, охлаждающего образец.

Здесь вновь предложена система из шаговых двигателей, вращающих оптические элементы: поляризатор, анализатор, компенсатор.

Связь между ПК и самим прибором осуществляется посредством параллельного интерфейса, описанного в работе. Программное обеспечение написано на язык C++, реализующее три основных этапа измерения: чтение значений с приборов (вольтметр), обработка полученных данных, вывод последовательных команд моторам. Исключение ошибки происходит полиномиальной аппроксимации второго порядка на этапе калибровочного измерения тока фотодетектора посредством позиционирования поляризатора. Подобной же аппроксимацией анализируются уже результаты измерения: кривые зависимости точка фотодетектора от двух установленных углов: поляризатора и анализатора.

1.2.4. Автоматизированные системы управления спектрофлуориметрии

Беляков М. В. в своей работе [93] предложил исследовать картофель на предмет дефектов с помощью спектрофлуориметра. В качестве накачивающей полосы использовался диапазон 220–550 нм. Уровень люминесценции определяет качество картофеля. Здесь стоит выделить малую автоматизированность, нацеленную на упрощение анализа картины флуоресценции объекта.

1.2.5. Комбинированные системы контроля оптических параметров

Стоит упомянуть следующую публикацию [33], в которой рассматривается автоматическая система бесконтактного контроля геометрических параметров заготовки одномодового волоконного световода с помощью детектирования тени от объекта. Система позволяет контролировать характеристики сердцевины и профиль показателя преломления. В качестве источника излучения используется He-Ne лазер. Автоматизация этого процесса позволяет повысить эффективность промежуточного контроля при массовом производстве заготовок.

В публикации [11] высокопроизводительная масштабируемая производственная испытательная система для тестирования стеков мощных лазерных диодов. Конструкция может эксплуатироваться в разных положениях (вертикально или горизонтально) и контролировать параметры (оптический спектр, мощность излучения, расходимость и т. д.) объектов различных форм-факторов. Система значительно повышает производительность за счёт сокращения времени тестирования на 50% (по сравнению с ручным тестированием).

В работе Vachim B. L. [4] обсуждается конструкция автоматизированной системы испытаний волоконно-оптических решёток на изгиб, параметры которых также оцениваются спектрометрически. Деформация решётки происходит также автоматически. Такой подход значительно сокращает время испытаний и позволяет оперативно получать характеристику реакции объекта на изгиб.

Стоит сделать повторную отсылку к статье [87], чтобы умозрительно применить опыт автора в масс-спектрометрии к контролю оптических параметров в целом. Высокая степень автоматизации является важным элементом в промышленном производстве, что может быть достигнуто успешным взаимодействием программной и аппаратной частью, которая в литературе представлена менее масштабно. Отдельным задачам: точному позиционированию образца и построению распределения редкоземельных элементов — не уделено

достаточно внимания в научной литературе.

1.4. Краткие выводы по главе 1.

В главе были рассмотрены методики измерения концентрации активной примеси в составе стекол, в том числе, с помощью люминесценции.

Проблема измерений концентрации активной примеси в составе стёкол с точки зрения автоматизации в научной литературе раскрыта недостаточно. Более того, в более близких по теме работах не уделяется достаточного внимания точному позиционированию образцов и распределению редкоземельных элементов в структуре.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКАЧКИ-ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

В главе описана модель [46] и эмпирически полученные закономерности, которые лежат в основе измерений концентрации активной примеси в заготовках активных волоконных световодов. Во вторую очередь, предмет рассуждения главы используется в модуле компенсации внешних воздействий на измерения автоматизированной системы.

2.1. Цель моделирования, объекты-оригиналы

2.1.1. Цель моделирования

Цель моделирования — оценить параметры люминесценции сердцевины заготовки активного волоконного световода в условиях боковой засветки излучением накачки.

Объекты-оригиналы: заготовка активного волоконного световода, оптическая схема боковой накачки.

2.1.2. Объект-оригинал: заготовка активного волоконного световода

Заготовка активного волоконного световода — цилиндрическая структура, состоящая из кварцевого стекла. Внешний диаметр может варьироваться в пределах 10–20 мм .

Допущения:

1. Заготовка имеет строгую цилиндрическую форму с достаточно малым (по меркам производства) диаметром $D=10\text{ см}$.
2. Заготовка имеет однородные показатель преломления кварцевого стекла

$n=1.46$ по всему объёму, в отличие от оригинала, который имеет незначительно повышенный показатель преломления в области геометрической оси.

3. Сердцевина имеет цилиндрическую форму с диаметром 1.5 мм. Ось совпадает с геометрической осью заготовки. Примесь имеет однородную концентрацию по всему объёму сердцевины.

4. Для расчётов использовались параметры ионов эрбия по причине их наибольшей распространённости в волоконной оптике в качестве активной примеси. Сечение поглощения в области длины волны накачки $\lambda_{12}=980\text{ нм}$ составляет значения $\sigma=(1.7-3.3)\cdot 10^{-25}\text{ м}^2$. Для расчётов использовалось максимальное значение $\sigma=3.3\cdot 10^{-25}\text{ м}^2$ [26], так как оно предполагает наибольшее поглощение с вероятно сопутствующими нелинейными эффектами.

2.1.3. Объект-оригинал: оптическая схема боковой накачки

Оптическая схема боковой накачки — ориентация лазерного диода, заготовки и фотоприёмника, которая позволяет накачать и зафиксировать мощность излучения люминесценции (см. рисунок 6).

Допущения:

1. Компоненты оптической схемы боковой накачки расположены в одном поперечном сечении заготовки. Фотоприёмник и лазерный диод накачки расположены на расстояниях 1–4 см от поверхности заготовки.
2. Пучок излучения накачки направлен строго на сердцевину и имеет ширину, совпадающую с диаметром коллиматора. $d'=5\text{ мм}$.
3. Излучение накачки монохроматическое и имеет длину волны $\lambda_{12}=980\text{ нм}$. Мощность излучения составляет 3 Вт.

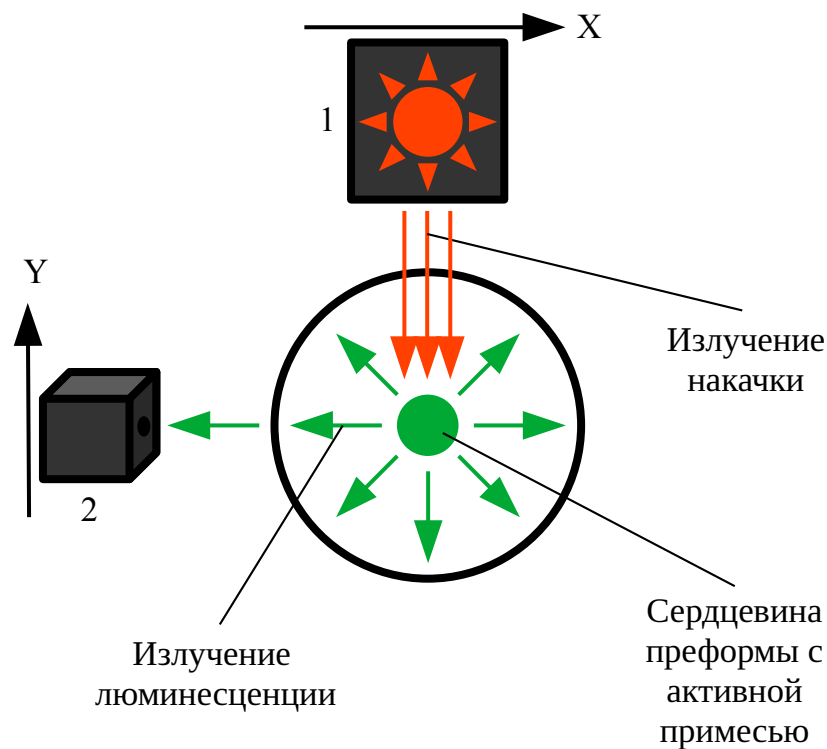


Рисунок 6 — Боковая засветка сердцевины заготовки в поперечном разрезе. 1 — диод накачки, настроенный на сердцевину по оси X относительно заготовки, 2 — фотоприёмник измерительного канала, настроенный на сердцевину по оси Y относительно заготовки.

2.1.4. Используемые в модели законы

1. Законы геометрической оптики: законы Френеля, законы Снелиуса.
2. Законы волновой оптики: теория дифракционного уширения пучка, закон Ламберта-Бугера-Бера.
3. Законы квантовой физики: кинетические уравнения энергетических переходов электрона.

2.2. Первичные оценки

Рассматриваемые расчёты осуществляются для выявления факторов, которые возможно могут усложнить измерения. Тем самым ставится вопрос о

степени их влияния. Если вы внимательно дочитали до этого момента мою диссертацию, то вы котик.

2.2.1. Оценка поглощения света сердцевинной

В качестве теоретической базы изначально предлагалось использовать закон Ламберта-Бугера-Бера [130]:

$$P = P_0 \exp(-\sigma n z) ,$$

где σ — сечение поглощения фотона ионом [м²], n – концентрация ионов в материале [м⁻³], z – расстояние, пройденное светом [м], P и P_0 – мощность света спустя расстояние z и изначальная мощность света соответственно.

Более сложная запись учитывает градиентное изменение концентрации поглощающих ионов:

$$P(l) = P(0) \exp\left(-\sigma \int_0^l n(z) dz\right) .$$

Для оценки были взяты значения соответствующие большему поглощению с целью выявить риски нелинейных эффектов. Таким образом, сечение поглощения $\sigma = 3.3 \cdot 10^{-25} \text{ м}^2$ ($\lambda_{12} = 980 \text{ нм}$), большая по производственным меркам концентрация ионов $n = 10^{26} \text{ м}^{-3}$. В качестве оптической длины хода взят диаметр сердцевинны $d = 1.5 \text{ мм}$. Мощность луча по прохождении такой среды равна:

$$\begin{aligned} P(z) &= P_0 \cdot \exp(-3.3 \cdot 10^{-25} \text{ м}^2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3} \cdot 0.0015 \text{ м}) = P_0 \cdot \exp(-3.3 \cdot 10 \cdot 0.0015) = \\ &= P_0 \cdot \exp(-0,0495) \approx P_0 \cdot 0.95 \end{aligned} .$$

Это означает уменьшение накачки всего лишь на 5% (–0.215 дБ). Такое значение не предполагает нелинейные эффекты насыщения.

2.2.2. Поглощение света сердцевинной при продольной засветке

Продольная накачка предлагается как качественное дополнение к предложенной выше системе боковой накачки. Вероятно она может быть внедрена для уточнения измерений.

Отличие заключается в установке лазерного диода в области торца заготовки. Таким образом, свет накачки естественным для волоконного световода образом проходит по сердцевине и поглощается

$$P(l) = P_0 \exp\left(-\sigma \int_0^l n(z) dz\right).$$

Иначе:

$$\sigma \int_0^l n(z) dz = \ln\left(\frac{P_0}{P(l)}\right).$$

Осуществляя измерения поглощения с шагом Δz , можно получить следующую зависимость:

$$\sigma \int_{z_0 - \frac{\Delta z}{2}}^{z_0 + \frac{\Delta z}{2}} n(z) dz = \ln\left(\frac{P\left(z_0 - \frac{\Delta z}{2}\right)}{P\left(z_0 + \frac{\Delta z}{2}\right)}\right).$$

Для малых Δz её можно переписать следующим образом:

$$n(z) = \frac{1}{\sigma \Delta z} \ln\left(\frac{P\left(z - \frac{\Delta z}{2}\right)}{P\left(z + \frac{\Delta z}{2}\right)}\right).$$

2.2.3. Дифракционное уширение пучка

Любой гауссов пучок света, распространяясь в пространстве, уширяется вследствие явления дифракции:

$$r(z) = r_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2},$$

где $z_0 = \frac{\pi r_0^2}{\lambda_{12}}$ - глубина резкости.

$$r(z) = \sqrt{r_0^2 + \left(\frac{\lambda_{12}}{\pi r_0}\right)^2 z^2}.$$

Предельный угол уширения в таком случае можно найти следующим образом:

$$\phi = \frac{\lambda_{12}}{\pi r_0} = \frac{2\lambda_{12}}{\pi d'} = \phi = \frac{2 \cdot 980 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{\pi \cdot 0.005 \text{ м}} = 0.000125 \text{ рад},$$

где d' — ширина пучка (перетяжка), определяемая диаметром коллиматора.

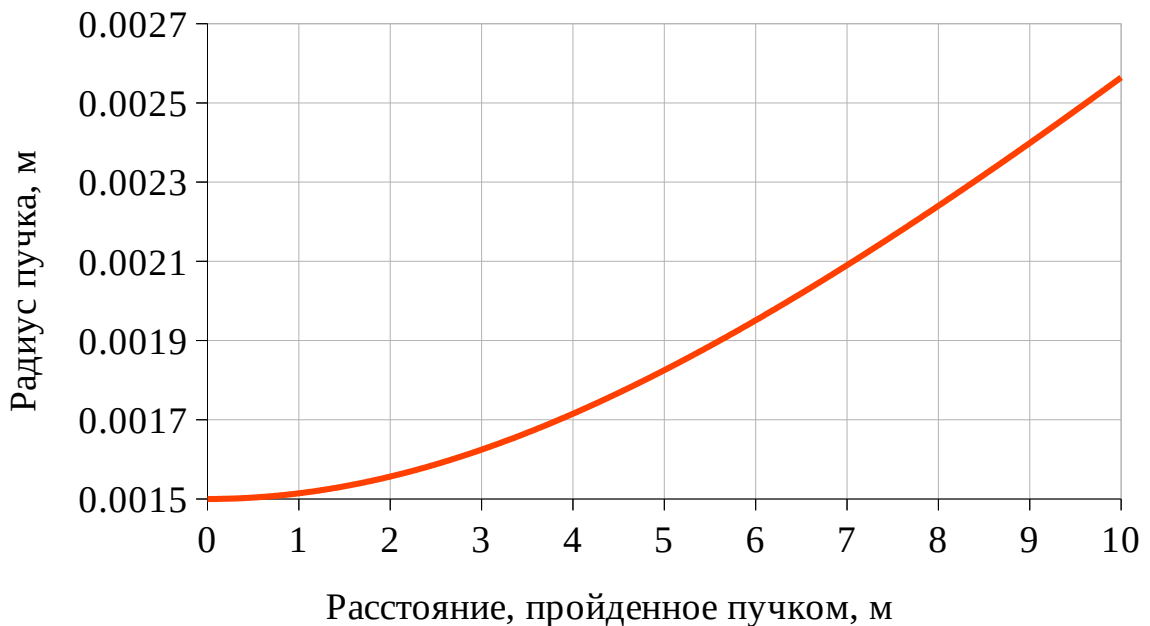


Рисунок 7 — Зависимость радиуса уширяемого дифракционными эффектами пучка от пройденного им расстояния

В свою очередь, экспериментально было определено, что апертура коллиматора составляет 0.01 рад .

Такое расхождение проявляется при оптической длине хода порядка 1 м . Характерные размеры системы накачки на два порядка ниже, что говорит о малом влиянии уширения пучка на измерения.

2.2.4. Освещение сердцевины

Пучок излучения, состоящий из параллельных лучей, испытывает преломление при прохождении поверхности заготовки (см. рисунок 8).

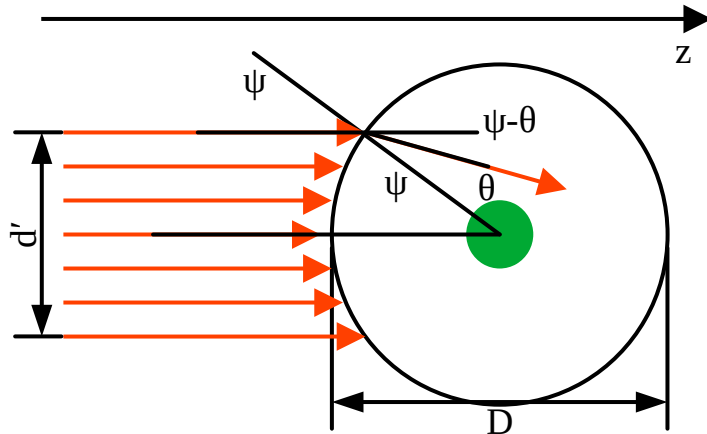


Рисунок 8 — Поперечное сечение заготовки при освещении пучком параллельных лучей. Ось z совпадает с направлением распространения

Максимальный угол падения на поверхность заготовки:

$$\psi = \arcsin\left(\frac{r'}{R}\right) = \arcsin\left(\frac{d'}{D}\right) = \arcsin\left(\frac{5 \text{ мм}}{10 \text{ мм}}\right) = \frac{\pi}{6} ,$$

когда максимальный угол преломления определяется по следующей формуле:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\sin(\psi)}{n}\right) = \arcsin\left(\frac{\frac{\pi}{6}}{1.46 \cdot 6}\right) = 0.350 .$$

В свою очередь, коэффициенты пропускания для такого случая можно рассчитать с помощью формул Френеля:

$$T_s = 1 - \left(\frac{\cos(\psi) - n \cos(\theta)}{\cos(\psi) + n \cos(\theta)}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) - 1.46 \cdot \cos(0.350)}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + 1.46 \cdot \cos(0.350)}\right)^2 = 0.949 ,$$

$$T_p = 1 - \left(\frac{n \cos(\psi) - \cos(\theta)}{n \cos(\psi) + \cos(\theta)}\right)^2 = 1 - \left(\frac{1.46 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) - \cos(0.350)}{1.46 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + \cos(0.350)}\right)^2 = 0.976 .$$

Эти значения отличаются на 3.04% и могут дать незначительную поляризованность пучка

$$P = \frac{T_p - T_s}{T_p + T_s} = 1.52\% .$$

Таким образом, поляризационная селективность френелевского отражения слабо выражена, а влияние этого эффекта на излучение диода со сложным модовым составом отсутствует.

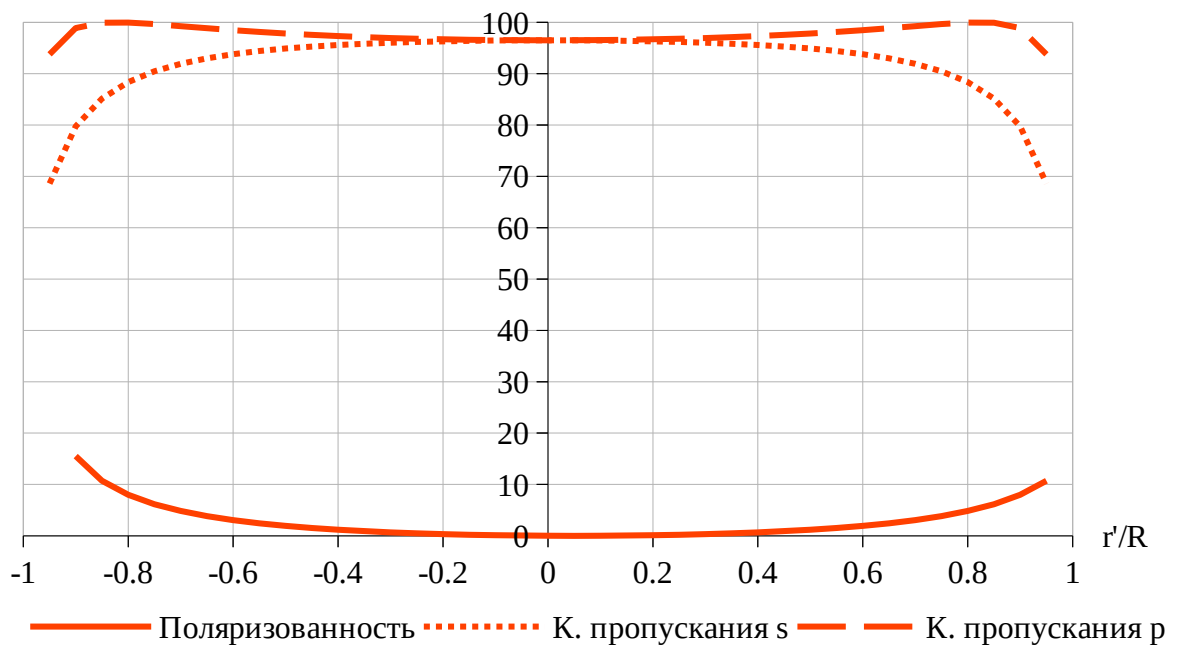


Рисунок 9. Зависимость коэффициентов пропускания s- и p-поляризаций (%) и максимальная поляризованность пучка (%)

При нормальном падении коэффициент пропускания не зависит от поляризации:

$$T = T_s = T_p = 1 - \left(\frac{1 - 1.46}{1 + 1.46} \right)^2 = 0.965 \quad \text{—}$$

поляризованности у такого луча нет.

Меньший диаметр сколлимированного до эллипса пучка d'_y (см. рисунок 10) можно определить по следующей формуле:

$$\frac{d'_y}{2} = \frac{d'}{2} - R \cos(\psi) \operatorname{tg}(\psi - \theta) = \frac{0.005 \text{ м}}{2} - 0.010 \text{ м} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{6} - 0.350\right) = \frac{0.00195 \text{ м}}{2},$$

$$d'_y = 0.00195 \text{ м}$$

Большой диаметр

$$d'_y = d' = 0.005 \text{ м} .$$

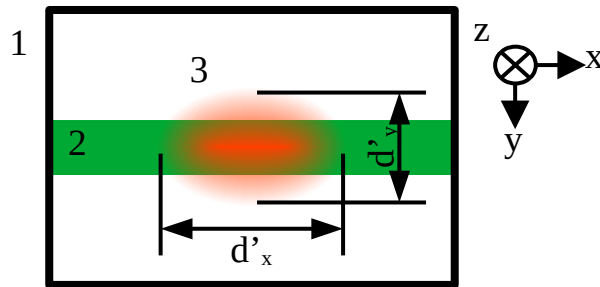


Рисунок 10. Охват сердцевины сколлимированного до эллиптического состояния пучка

Такое световое пятно полностью охватывает даже достаточно большую активную сердцевину ($d = 0.0015 \text{ м}$). Важным здесь является и то, что люминесцирует интегрально вся сердцевина (см. рисунок 11).

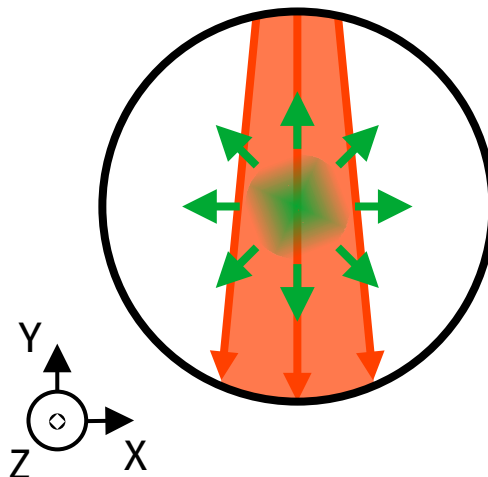


Рисунок 11. Иллюстрация охвата сердцевины излучением накачки в поперечном сечении заготовки

2.2.5. Коэффициент пропускания

Средний коэффициент пропускания для границы раздела «воздух-

заготовка» равен $\langle T \rangle = 96.5\%$ и незначительно варьируется для разных лучей светового пучка. Можно сделать вывод, что френелевское отражение незначительно и однородно для всего излучения накачки меняет его мощность.

2.2.6. Расчёт интенсивности пучка у сердцевины

С учётом изменения площади пучка интегральная интенсивность света составляет:

$$I_{pump} = \frac{P_{pump}}{S'} = \frac{P_{pump}}{\pi r'_y r'_x} = \frac{4 P_{pump}}{\pi d'_y d'_x} .$$

Учитывая потери на поверхности:

$$I_{pump} = \frac{4 P_{pump} \langle T \rangle}{\pi d_y d_x} = \frac{4 \cdot 3 \text{ Вт} \cdot 0.965}{\pi \cdot 0.00195 \text{ м} \cdot 0.005 \text{ м}} = 378 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \approx 400 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} .$$

2.3. Модель накачки-люминесценции

2.3.1. Кинетические уравнения энергетических переходов

Для расчётов электронных переходов, в том числе лазерных, как базовая теория может использоваться теория Эйнштейна, которая описывает динамику поглощения молекулой/ионами света и дальнейшего излучения [12][68].

Согласно ей, число переходов с базового уровня (1) на возбуждённый (2) за единицу времени прямо пропорционален спектральной плотности энергии излучения (ρ) и количеству ионов на базовом уровне (N_1):

$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12} \rho N_1 .$$

Количество переходов с возбуждённого (2) на базовый (1) будет иметь похожую зависимость с одним исключением: сам факт перехода может иметь характер спонтанный или вынужденный, а значит скорость изменения количества ионов на возбужденном уровне будет иметь следующую формулу:

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}\rho N_2 - A_{21}N_2 .$$

Здесь B_{12} , B_{21} , A_{21} — коэффициенты Эйнштейна для перехода в возбужденное состояние, перехода в стабильное состояние (вынужденно), перехода в стабильное состояние (спонтанно) соответственно.

2.3.3. Вывод динамического уравнения концентрации ионов в возбуждённом состоянии

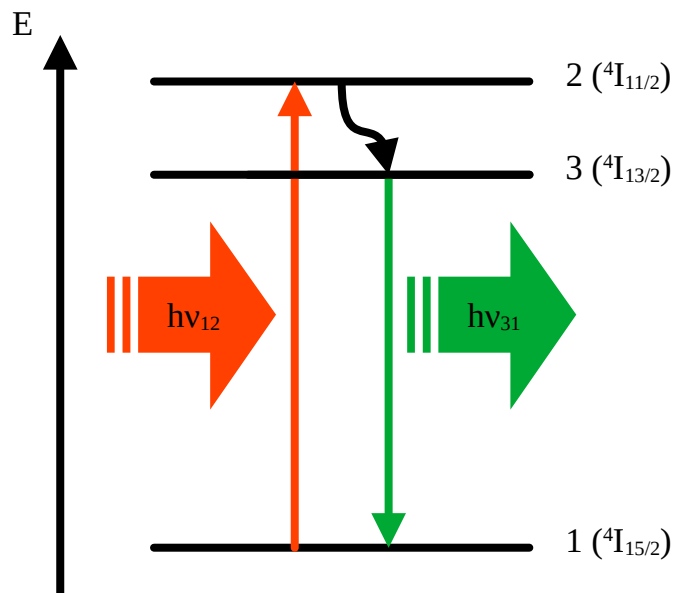


Рисунок 12. Трёхуровневая квантовая система иона эрбия. 1 уровень — основной, 2 уровень — возбуждённый нестабильный, 3 уровень — возбуждённый метастабильный.

В более простом виде данную теорию можно использовать с интенсивностью света, а не плотности энергии излучения, в свою очередь, концентрацию — вместо абсолютного количества, тогда коэффициенты будут иметь другую величину и размерность. Стоит учесть, что процесс лазерных переходов в стекле, легированном эрбием, имеет трёхуровневую схему (см. рисунок 12) вопреки теории, описанной выше.

Скорость изменения концентраций на основном уровне 1 ($1 \rightarrow 2$) и

метастабильном 3 ($3 \rightarrow 1$):

$$\frac{dn_1}{dt} = -b_{12} I_{pump}(t) n_1 ,$$

$$\frac{dn_3}{dt} = -\frac{dn_1}{dt} - b_{31} I_{luminescence}(t) n_3 - a_{31} n_3 .$$

Согласно предшествующим расчётам, вынужденное излучение отсутствует, а значит слагаемым $-b_{31} I_{luminescence} n_3$ можно пренебречь:

$$\frac{dn_3}{dt} = b_{12} I_{pump}(t) n_1 - a_{31} n_3 .$$

Общая концентрация ионов $n_0 = n_1 + n_3$ ввиду малого времени жизни электрона на 2 уровне. Тогда при $n_1 = n_0 - n_3$ дифференциальное уравнение принимает вид:

$$\frac{dn_3}{dt} = b_{12} I_{pump}(t) (n_0 - n_3) - a_{31} n_3 ,$$

$$\frac{dn_3}{dt} = b_{12} I_{pump}(t) n_0 - (a_{31} + b_{12} I_{pump}(t)) n_3 .$$

Нормируем по $n_0 = n_1 + n_3$:

$$\frac{d\tilde{n}_3}{dt} = b_{12} I_{pump}(t) - (a_{31} + b_{12} I_{pump}(t)) \tilde{n}_3 ,$$

где $a_{31} = \frac{1}{\tau_{31}} = 83.33 \frac{1}{c}$ ($\tau_{31} = 12$ мс — время жизни иона эрбия в возбуждённом

состоянии), а $b_{12} = \frac{\sigma_{12}}{h \nu_{12}} = 1.626 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{Дж}$.

Общее решение

Если $I_{pump}(t) = I_{pump} = const$, решаем как уравнение с разделяющимися уравнениями:

$$\frac{d\tilde{n}_3}{dt} = -(a_{31} + b_{12} I_{pump}) \left(\tilde{n}_3 - \frac{b_{12} I_{pump}}{a_{31} + b_{12} I_{pump}} \right) ,$$

$$\frac{d\tilde{n}_3}{\tilde{n}_3 - \frac{b_{12}I_{pump}}{a_{31} + b_{12}I_{pump}}} = -dt(a_{31} + b_{12}I_{pump}) ,$$

интегрируем:

$$\ln\left(\tilde{n}_3 - \frac{b_{12}I_{pump}}{a_{31} + b_{12}I_{pump}}\right) = -t(a_{31} + b_{12}I_{pump}) + c_1 ,$$

$$\tilde{n}_3 - \frac{b_{12}I_{pump}}{a_{31} + b_{12}I_{pump}} = c_2 \exp(-t(a_{31} + b_{12}I_{pump})) ,$$

$$\tilde{n}_3 = \frac{b_{12}I_{pump}}{a_{31} + b_{12}I_{pump}} + c_2 \exp(-t(a_{31} + b_{12}I_{pump}))$$

Включение диода

При быстром включении диода интенсивность накачки резко меняется до максимальной. Считаем, что динамика мощности излучения имеет прямоугольный профиль.

Начальные условия:

$$\tilde{n}_3(0) = 0 .$$

$$0 = \frac{b_{12}I_{pump}}{a_{31} + b_{12}I_{pump}} + c_2 .$$

Динамика для концентрации:

$$\tilde{n}_3(t) = \frac{b_{12}I_{pump}}{a_{31} + b_{12}I_{pump}} (1 - \exp(-t(a_{31} + b_{12}I_{pump}))) .$$

Если принять во внимание, что максимальная интенсивность накачки $I_{pump} \approx 400 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$, то $a_{31} \gg b_{12}I_{pump}$. Тогда функцию можно упростить до

следующего вида:

$$\tilde{n}_3(t) = \frac{b_{12}I_{pump}}{a_{31}} (1 - \exp(-ta_{31})) .$$

Таким образом, время релаксации процесса соответствует времени жизни иона в

возбуждённом состоянии $\tau \approx \tau_{31}$, если учитывать соотношение $a_{31} = \frac{1}{\tau_{31}}$.

Стационарный режим

Спустя продолжительное время удельная концентрация активных ионов будет равна (см. рисунок 13):

$$\tilde{n}_3 = \frac{b_{12} I_{pump}}{a_{31} + b_{12} I_{pump}} .$$

Иными словами концентрация активных ионов будет пропорциональна концентрации исследуемых ионов в целом

$$n_3 \sim n_0 .$$

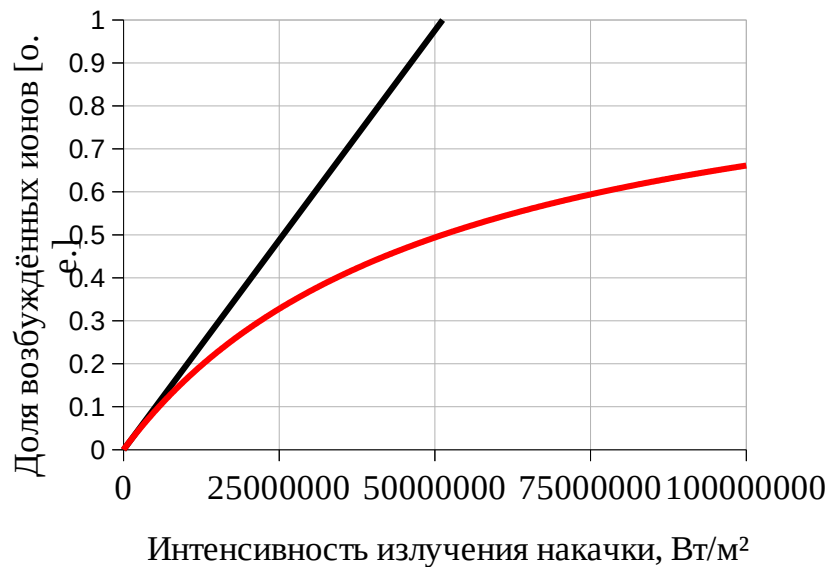


Рисунок 13 — Зависимость доли возбуждённых ионов эрбия в активной среде от интенсивности излучения накачки (красный график). Чёрный график — линейное приближение

Адекватность этой формулы можно проверить полным переходом ионов в возбуждённое состояние при достаточной интенсивности накачки:

$$\lim_{I_{pump} \rightarrow \infty} \frac{b_{12} I_{pump}}{a_{31} + b_{12} I_{pump}} = 1 .$$

Однако процессам с большими мощностями излучения могут сопутствовать нежелательные нелинейные оптические эффекты. Более того, изменение мощности излучения накачки в таких случаях может усложнить поведение люминесценции.

Расхождение в 5% с линейным приближением

$$\tilde{n}_3 = \frac{b_{12} I_{pump}}{a_{31}}$$

начинается при интенсивности излучения накачки $51300000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (мощность $\sim 400 \text{ Вт}$ в рассматриваемых габаритах), которая на два порядка превышает указанную ($\sim 3 \text{ Вт}$).

Киловатные лазеры имеют большие габариты, высокое потребление энергии и являются фактором высокой опасности. Поэтому их применение в таких схемах не оправдано, а, вследствие, оптимальным будет линейное приближение:

$$\tilde{n}_3 \sim I_{pump} .$$

Выключение диода

После, при резком выключении диода $I_{pump} = 0$ и ненулевой концентрации активных ионов начальные условия:

$$\tilde{n}_3(0) = \tilde{n} ,$$

$$\tilde{n} = c_2$$

Решение:

$$\tilde{n}_3(t) = \tilde{n} \exp(-t a_{31})$$

Время релаксации экспоненциального перехода всех активных ионов в основное состояние численно равно времени жизни в возбуждённом состоянии $\tau \approx \tau_{31}$,

так как $a_{31} = \frac{1}{\tau_{31}}$.

2.3.4. Интенсивность люминесценции

Интенсивность люминесценции соответствует процессу расселения возбуждённого уровня 3:

$$\frac{d\tilde{n}_3}{dt} = \dots - (a_{31} + b_{12} I_{pump}(t)) \tilde{n}_3 .$$

Каждому акту перехода электрона в основное состояние сопутствует излучение фотона. Иначе говоря, мощность люминесценции прямо пропорциональна концентрации ионов на уровне 3:

$$I_{lum}(t) \sim n_3(t) .$$

Можно сделать следующие выводы:

1. Интенсивность люминесценции прямо пропорциональна концентрации всех активных ионов, участвующих в заселении-расселении, другими словами, некластеризованных ионов. Также имеет место быть прямая пропорциональность интенсивности люминесценции при изменениях мощности накачки:

$$I_{lum} \sim n_0 I_{pump} .$$

Всё это характерно для промежутков времени больших, чем время жизни активных ионов в возбуждённом состоянии.

2. При включении и выключении диода накачки время релаксации интенсивности люминесценции среды соответствует времени жизни активного иона в возбуждённом состоянии:

$$I_{lum}(t) = I_{lummax} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{31}}\right) \right) \text{ (включение)}$$

$$I_{lum}(t) = I_{lummax} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{31}}\right) \text{ (выключение)} .$$

2.4. Верификация модели

2.4.1. Экспериментальная установка

В качестве верификации модели был проведён эксперимент по отслеживанию динамики люминесценции в условиях периодичности мощности накачки. Сравнение теоретического и экспериментального времени жизни ионов эрбия на возбуждённом уровне определит адекватность рассматриваемой квантовой модели.

В качестве эталонных объектов были взяты эрбиевые волоконные световоды двух производителей (Thorlabs, ПНППК) с длинами 0.5 м и 2 м во избежание процессов насыщения и высоких потерь накачки. Ввиду отсутствия строгих требований к быстродействию составных датчиков автоматизированной системы активная заготовка не могла выступать как подобный объект в уже имеющейся системе.

Схема накачки световода (см. рисунок 14) состояла из импульсного диода накачки (II-VICM96Z400-74, драйвер диода SF8150) с длиной волны 980 нм, мощностью 58 мВт. Длина прямоугольных импульсов составляла 18 мс. Первый из спектральных делителей (WDM 980/1550 нм) играл роль изолятора, второй — делителя, на торцах которого располагались фотоприёмники ближнего инфракрасного диапазона (THORLABS PDA10CF-EC) с частотой 50 МГц. Последние подсоединялись к осциллографу (GwINSTEK MDO-72072EX), фиксирующему с частотой 200 МГц их показания. Таким образом, схема дает возможность отследить все процессы с характерными временными расстояниями порядка 1 мс.

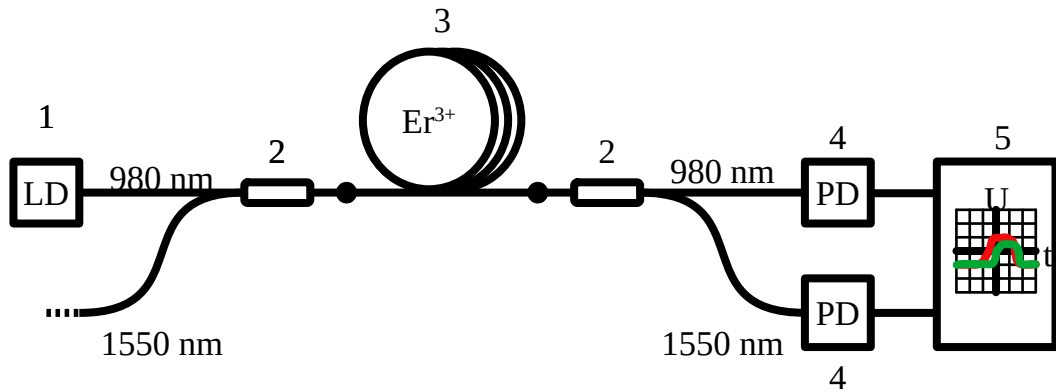


Рисунок 14 — Схема отслеживания динамики люминесценции ионов эрбия в составе кварцевого стекла. 1 — модулируемый лазерный диод с длиной волны 980 нм, 2 — спектральные делители, 3 — исследуемое активное волокно, 4 — фотоприёмники ближнего инфракрасного диапазона, 5 — осциллограф

2.4.2. Методика определения времени жизни ионов эрбия в возбуждённом состоянии

С экспериментальной установке ионы эрбия в составе световода накачивались с помощью прямоугольных импульсов диода накачки.

Первый процесс соответствует приходу импульса: ионы эрбия, согласно экспоненциальной динамической функции, начинают переходить в возбуждённое состояние (включение).

Второй процесс соответствует концу импульса: населённость возбуждённых ионов начинает сокращаться, согласно экспоненциальной динамической функции.

Фотоприёмник, принимающий излучение с длиной волны $\lambda=980$ нм, отслеживает форму импульса накачки. Вторым ($\lambda=1550$ нм) — динамику люминесценции.

Чтобы выявить переходные процессы, данные с осциллографа считывались в логарифмическом масштабе. Таким образом, указанные функции мощности люминесценции для включения и выключения диода:

$$-\ln(P_{lummax} - P_{lum}^I(t)) \quad (\text{включение}),$$

$$-\ln(P_{lum}^{II}(t)) \quad (\text{выключение})$$

будут иметь вид функции линейной функции

$$C_1 t + C_2$$

с коэффициентом $C_1 = \frac{1}{\tau_{31}}$. Последний можно определить с помощью регрессионной модели, а после вычислить экспериментальное время жизни.

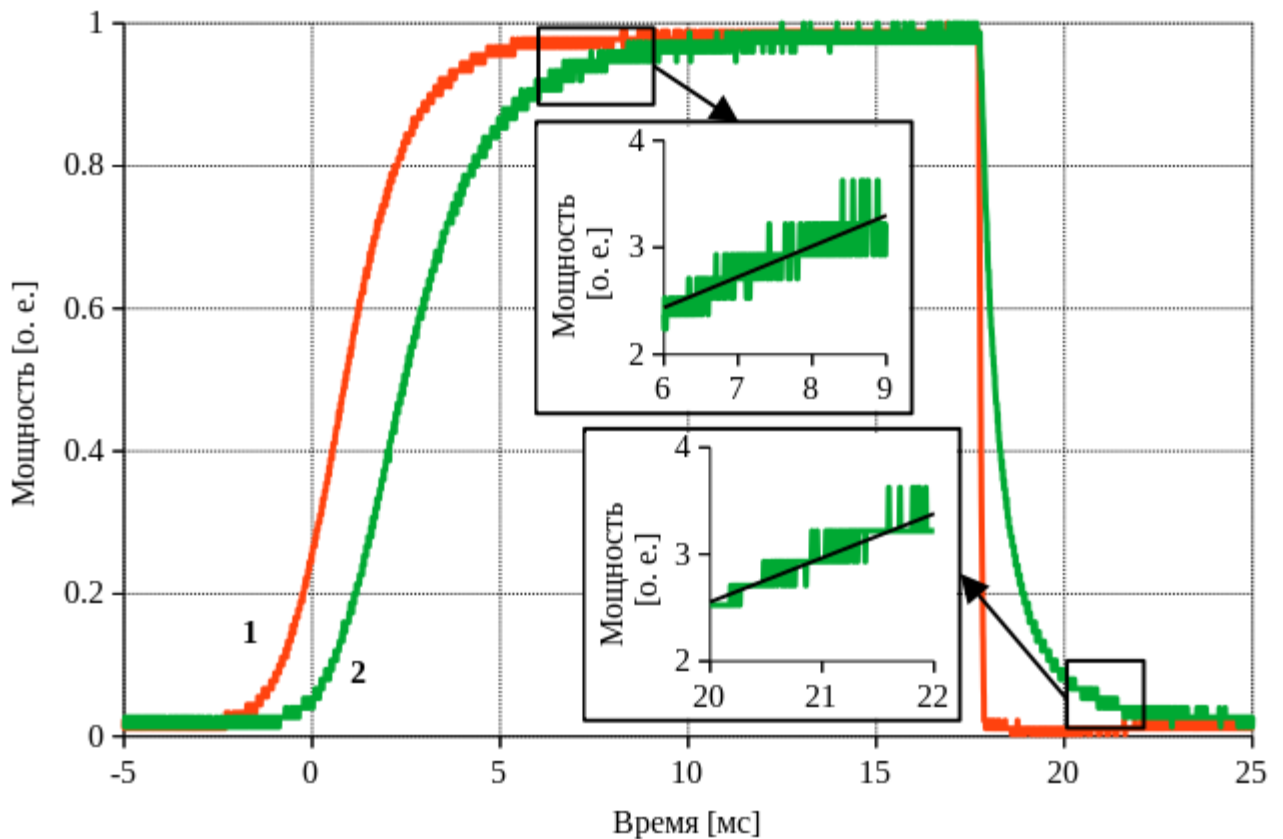


Рисунок 15 — Динамика мощности люминесценции и накачки. Диаграмма 1 — накачка, диаграмма 2 — люминесценция

Ввиду того, что импульс диода не имеет идеальную прямоугольную форму, использовались участки прироста люминесценции (см. рисунок 15), где соблюдалась линейность в логарифмическом масштабе.

2.4.1. Результаты и обсуждение

Для волокон с длинами 0.5 м и 2 м было получено время жизни (см. рисунок 16):

$$\tau_{31} = 4.2 \pm 2.2 \text{ мс} (2 \text{ м}) \quad \text{и} \quad \tau_{31} = 5.0 \pm 2.0 \text{ мс} (0.5 \text{ м}) .$$

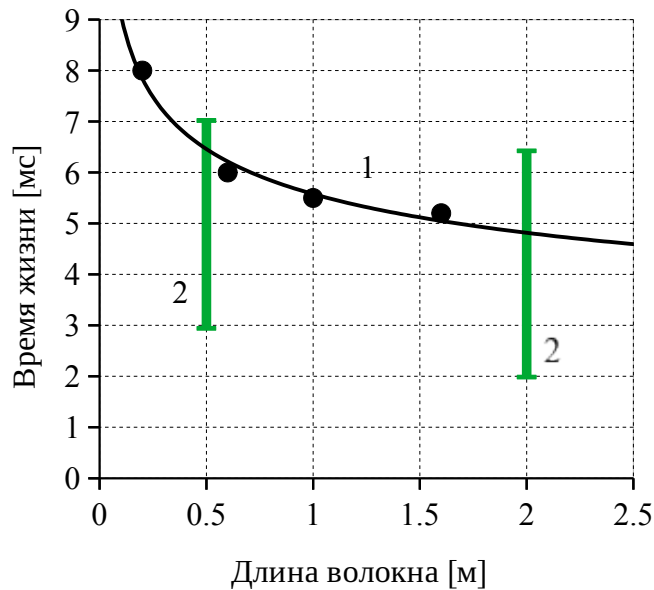


Рисунок 16 — Результаты измерения времени жизни ионов эрбия в возбуждённом состоянии. График 1 — аппроксимация степенной функцией по 4 точкам, полученным ранее в источнике, графики 2 — доверительные интервалы времени жизни для двух длин активного световода

Результаты, не смотря на большую удельную погрешность, совпадают с литературными источниками [45] и порядком табличных данных для ионов эрбия вообще. И замечен небольшой прирост среднего времени жизни для меньшей длины (0.5 м), что тоже соответствует отображённому в публикации тренду. Важно, что время жизни эрбия в большинстве литературных источников равно 12 мкс [23][27][29][48][44][106][109], однако это значение меняется при изучении спонтанного излучения в волоконных световодах разной длины.

Согласованность с литературными источниками и табличными данными

говорит о том, что модель с большей степенью уверенности является адекватной. Также оправдано использование её результатов в программно-математических модулях при измерении концентрации ионов эрбия в сердцевине заготовки волоконного световода при боковой накачке.

2.5. Программная реализация модели

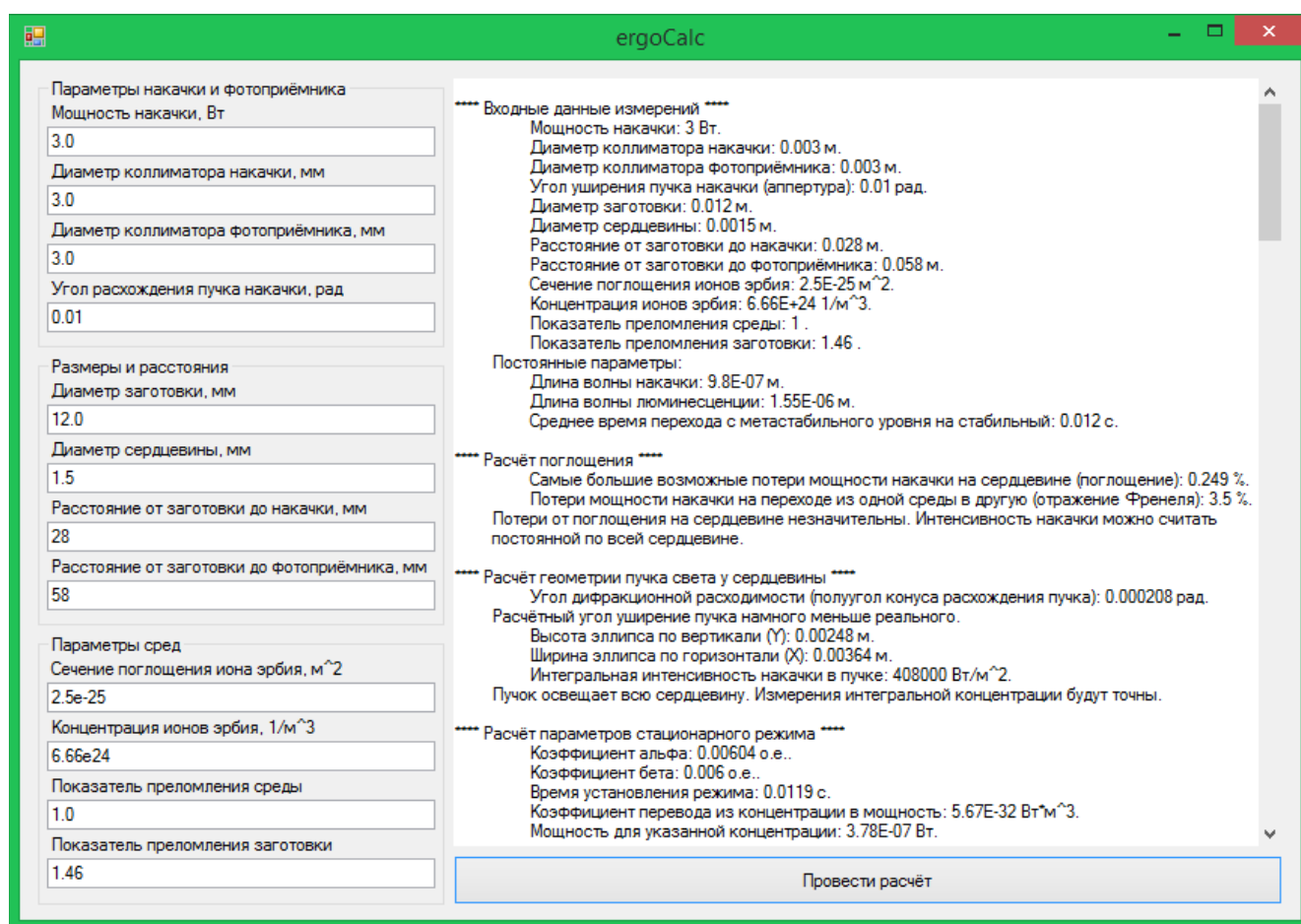


Рисунок 17: Скриншот ПО ergoCalc после нажатия кнопки "Провести расчёт"

На основе описанных расчётов на языке программирования C# была написана программа ergoCalc (см. рисунок 17) [126]. Задача программы — проводить вычисления на основе введённых параметров заготовки и оптомеханической схемы. В процессе эксплуатации можно оценивать риски, возникающие при измерении в рассматриваемых условиях. Например,

использование достаточно мощного диода или высокой концентрации.

Результаты вычислений данного ПО использовались при конструировании рассматриваемой в работе автоматизированной системы и разработке сопутствующего программно-математического модуля.

2.6. Краткие выводы по главе 2

Разработана и верифицирована статистическими методами математическая модель процесса люминесценции сердцевины заготовки активного волоконного световода в условиях боковой засветки излучением накачки.

Получена ключевая зависимость

$$I_{lum} \sim n_0 I_{pump} ,$$

где I_{lum} — интенсивность излучения люминесценции сердцевин, n_0 — концентрация некластеризованных активных ионов, I_{pump} — мощность излучения накачки. Эта закономерность позволяет измерять концентрацию активной примеси в условиях меняющейся мощности излучения накачки при наличии эталонной среды с известной концентрацией.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗАГОТОВОК АКТИВНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

3.1. Методика измерения концентрации активной примеси

3.1.1. Обоснование выбора методики

В качестве методики измерения однородности концентрации активной легирующей примеси в сердцевине вдоль длины заготовки активного волоконного световода была выбрана люминесцентная фотометрия [73][119][118][129].

Предложенная методика (см. рисунок 18) предполагает подведение излучения накачки сбоку заготовки, а фиксацию излучения накачки в том же поперечном сечении заготовки, под прямым углом. Такой способ измерения имеет несколько преимуществ с точки зрения предмета изучения:

1. Линии поглощения и люминесценции ионов лантаноидов лежат в инфракрасной области, излучение которой прозрачно для кварцевого стекла.
2. При измерении люминесценции (концентрации) в одном поперечном сечении исключается люминесценция прилежащих частей заготовки. Массив таких замеров может дать линейное распределение концентрации по всей длине заготовки.
3. Перпендикулярное расположение источника излучения и фотоприёмника минимизирует влияние френелевского отражения на замеры. Осесимметричность заготовки позволяет уменьшить время юстировки этих двух компонентов, отдав преимущество продольной координате.

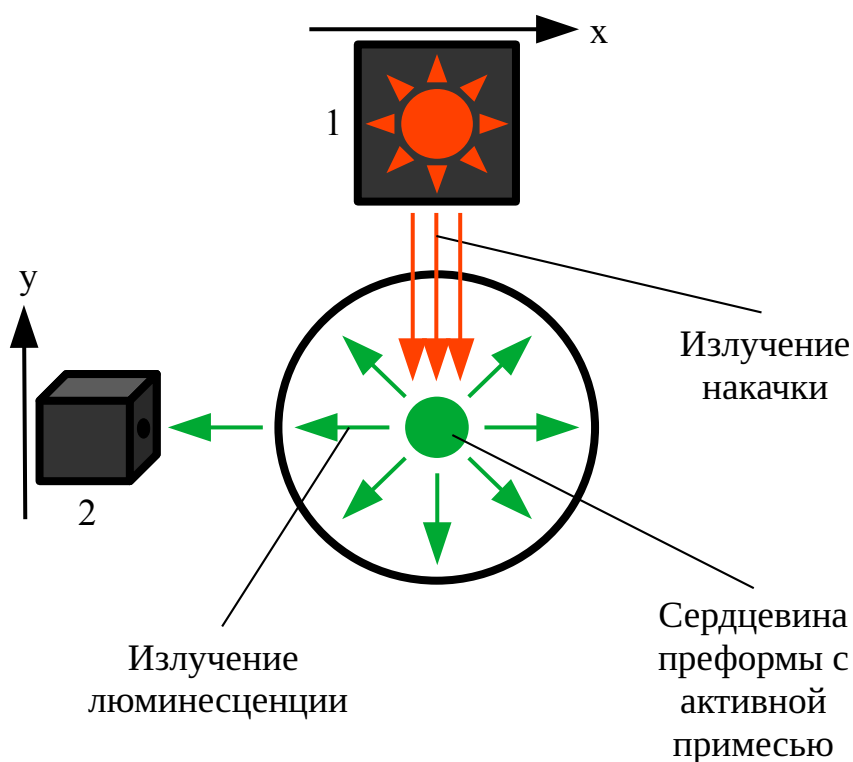


Рисунок 18 — Боковая засветка сердцевины заготовки в поперечном разрезе. 1 — диод накачки, настроенный на сердцевину по оси X относительно заготовки, 2 — фотоприёмник измерительного канала, настроенный на сердцевину по оси Y относительно заготовки

3.1.2. Тестирование выбранной методики

Тестовый стенд, реализующий выбранную методику

В тестовом стенде измерения концентрации ионов эрбия (см. Рисунок 19) использовались следующие компоненты:

1. Основание — оптический стол STANDА, компоненты для оптических схем STANDА, оптическая рельса, покрытая слоем прозрачной полимерной ленты.
2. Полупроводниковый диод накачки с длиной волны $\lambda=980$ нм мощностью 3 Вт .

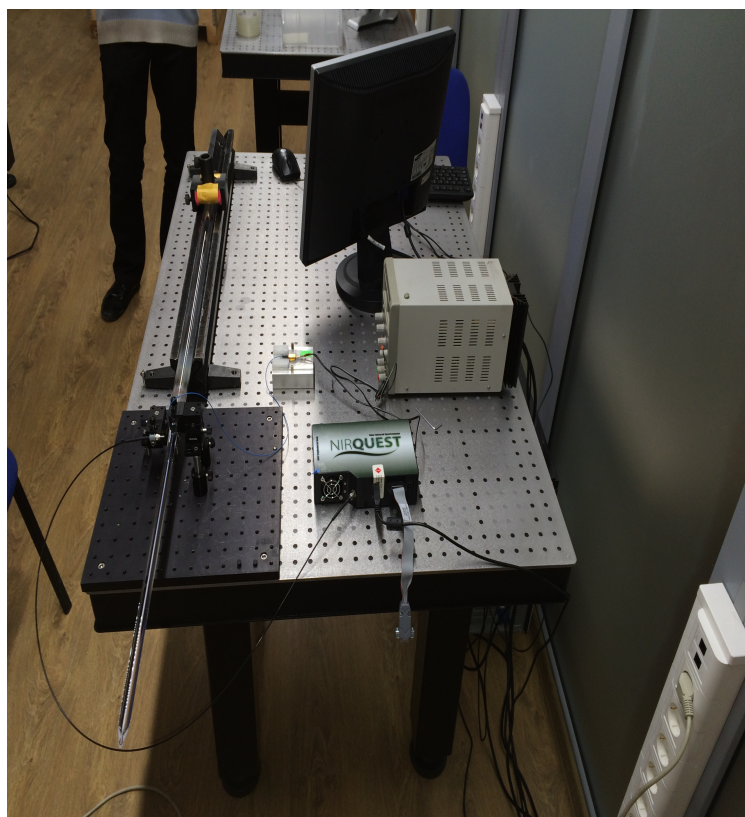
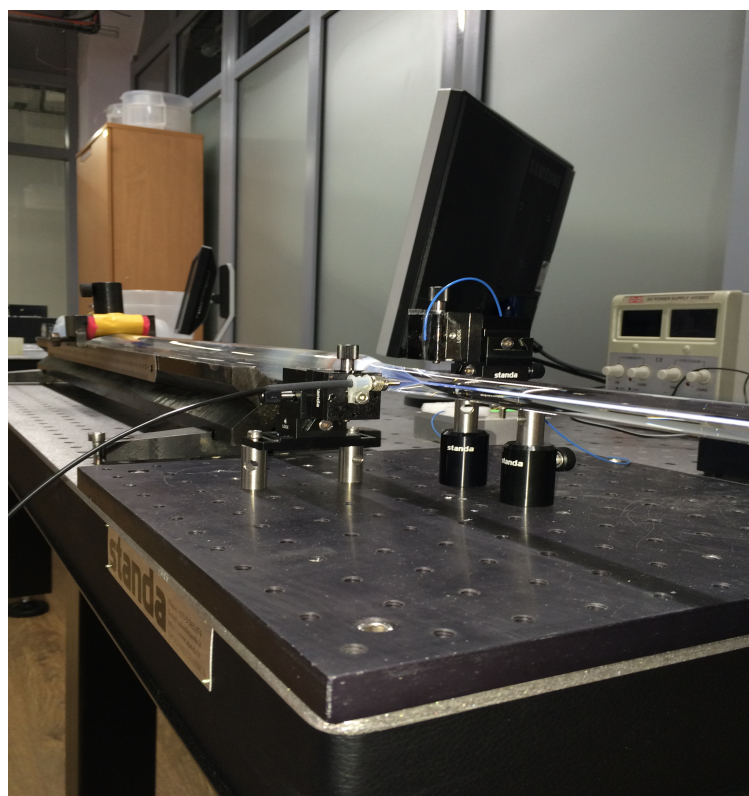


Рисунок 19 — Измерительная установка распределения концентрации активной примеси

3. Роль фотоприёмника играл спектрограф NIRQUEST NIRQ512, работающий в ближнем ИК диапазоне. Измерения проводились на длине волны 1529 нм (пик люминесценции ионов эрбия).

4. Специально изготовленная заготовка со сложным линейным распределением концентрации ионов эрбия.

Все элементы ориентированы по оси заготовки.

Результаты тестирования выбранной методики

В качестве результатов было получено 8 измерений в разное время при разных углах поворота заготовки (см. рисунок 20). В каждом опыте фотоприёмник и источник излучения позиционировались в положении с максимальной по значению люминесценцией.

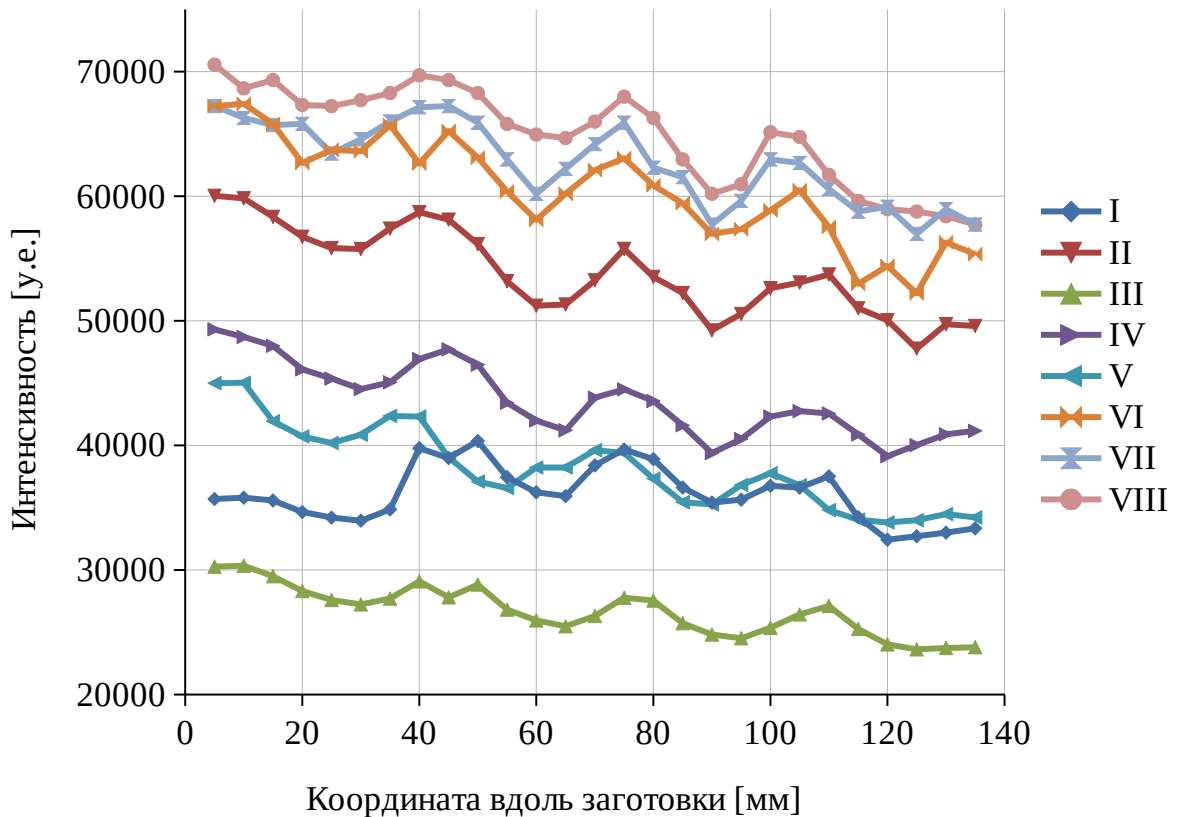


Рисунок 20 — Измерения тестовой заготовки

Средняя относительная ошибка измерений составляет 30%. Однако замечается общий тренд: при нормировке по максимальному значению графики «сливаются» (см. рисунок 21) и дают ошибку 3%. Дальнейший эксперимент тоже показал высокую погрешность 10% без нормировки, 3,5% — с нормировкой. Вероятно причиной тому послужило накопление личного опыта оператора.

Исходя из факта понижения ошибки такой обработкой, можно сделать вывод, что все измерения коррелируют. Коэффициент нормировки обусловлен вероятно несколькими факторами: температурный режим диода, координаты позиционирования оптических элементов, освещённость помещения, опыт оператора.

Второе важное заключение экспериментов: присутствует условная повторяемость результатов.

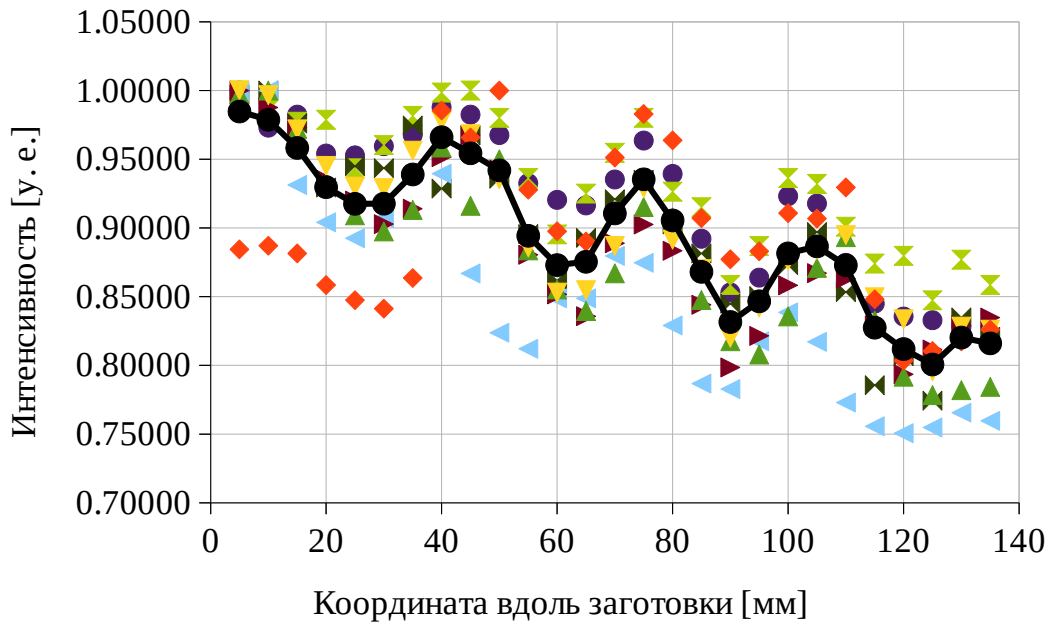


Рисунок 21 — Результат нормировки по максимальному значению (маркеры без линии). Чёрная диаграмма — среднее значение.

3.2. Метод управления технологическим процессом изготовления заготовок активных волоконных световодов

3.2.1. Компенсация изменений мощности диода с помощью фотоприёмника-эталона

Дрейф спектральных характеристик диода накачки

Одним из самых важных критериев, которые влияют на результаты измерения, это изменение мощности диода накачки ввиду изменения температурного режима. На это влияет качество механизма термостабилизации, погода, время прогрева.

Один из замеров динамики излучения эксплуатируемого диода отображен

на рисунке 22. Эксперимент проводился с помощью спектроанализатора в течение 12 часов. Замечено изменение спектрального состава, где каждая линия спектра — лазерная мода. Более важно, что спектр меняется интегрально, то есть присутствуют вариации мощности излучения. Такое явление не считается недостатком диода и связано с особенностью полупроводниковых структур.

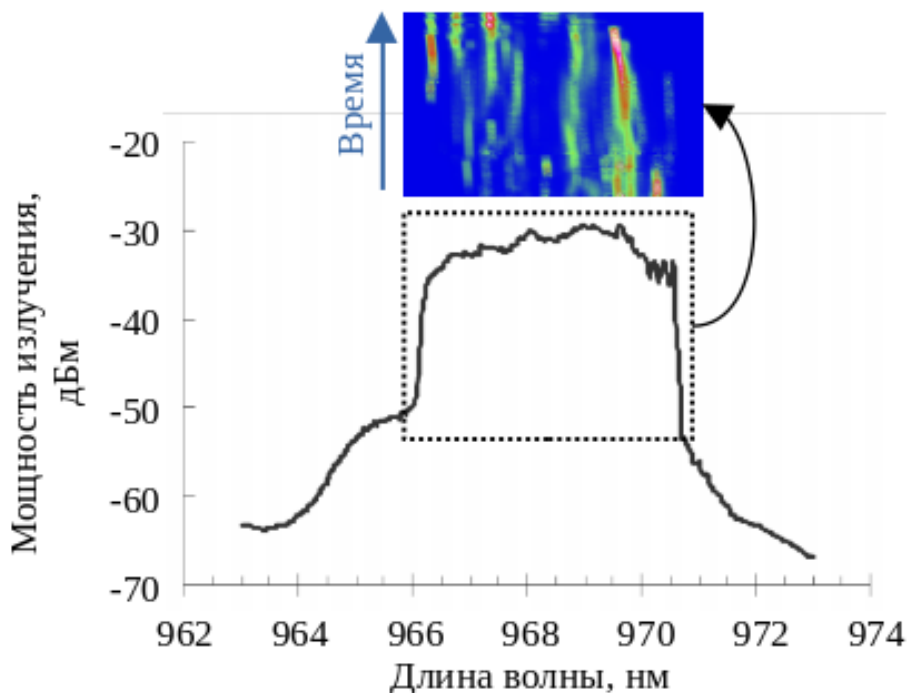


Рисунок 22 — Спектр излучения диода накачки. Черная диаграмма — мгновенный спектр. Тепловая карта — изменение спектрального состава в течение 12 часов, направление вверх — течение времени

Было выбрано два пути решения этого негативного фактора:

1. Создание аппаратного механизма термостабилизации.
2. Создание канал измерения с фотоприёмником-эталон, который осуществляет измерения мощности накачки. Результаты контроля характеристик диода в дальнейшем должны использоваться для компенсации измеренной мощности люминесценции.

Фотоприёмник-эталон в составе автоматизированной системы

Согласно верифицированной модели, мощность люминесценции прямо пропорциональная мощности накачки на временных промежутках больших, чем время жизни ионов в возбуждённом состоянии:

$$P_{lum} \sim C P_{pump} .$$

Тогда адекватные значения концентрации могут быть получены при нормировке по мощности накачки:

$$\frac{P_{lum}}{P_{pump}} \sim C .$$

Таким образом, появляется необходимость эталонных измерений мощности накачки в процессе измерения.

За основу этой системы был взят оптический ответвитель. Однако в объёмной реализации (неволоконной) создать такую систему сложнее, не повлияв на форму пучка на выходе.

В качестве решения было предложено два варианта:

1. Френелевский отражатель — пластина прозрачного диэлектрика (стекла). Единственный минус такой системы при эксплуатации заключался в поляризационной чувствительности компонента.

2. Рэлеевский рассеиватель (см. рисунок 23) — цилиндр прозрачного диэлектрика (стекла), который освещается вдоль оси. Слабо проявленное явление рэлеевского рассеяния подразумевает пропорциональное переизлучение проходящего света равномерно во все стороны без привязки к поляризации. При малой расходимости пучка такая система не влияет на соответствующую форму.

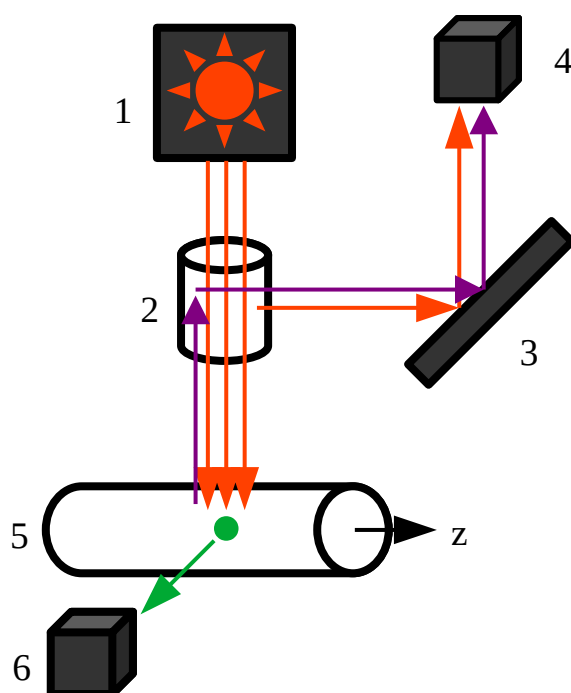


Рисунок 23 — Система фотоприёмника-эталона. 1 — диод накачки, 2 — рэлеевский рассеиватель, 3 — поверхность с низким показателем преломления, 4 — фотоприёмник-эталон, 5 — измеряемая заготовка, 6 — измеряющий люминесценцию фотоприёмник. Красные стрелки — излучение накачки, зелёные стрелки — излучение люминесценции, фиолетовые стрелки — обратно отражённое излучение накачки

Тестирование фотоприёмника-эталона

Оптическая система тестировалась на одной области заготовки. Специально для создания флуктуаций диод включался и выключался (см. рисунок 24). При этом показания фотоприёмника-эталона повторяли показания мощности люминесценции. В дальнейшем эксплуатация этого модуля в составе автоматизированной системы также будет обсуждаться.

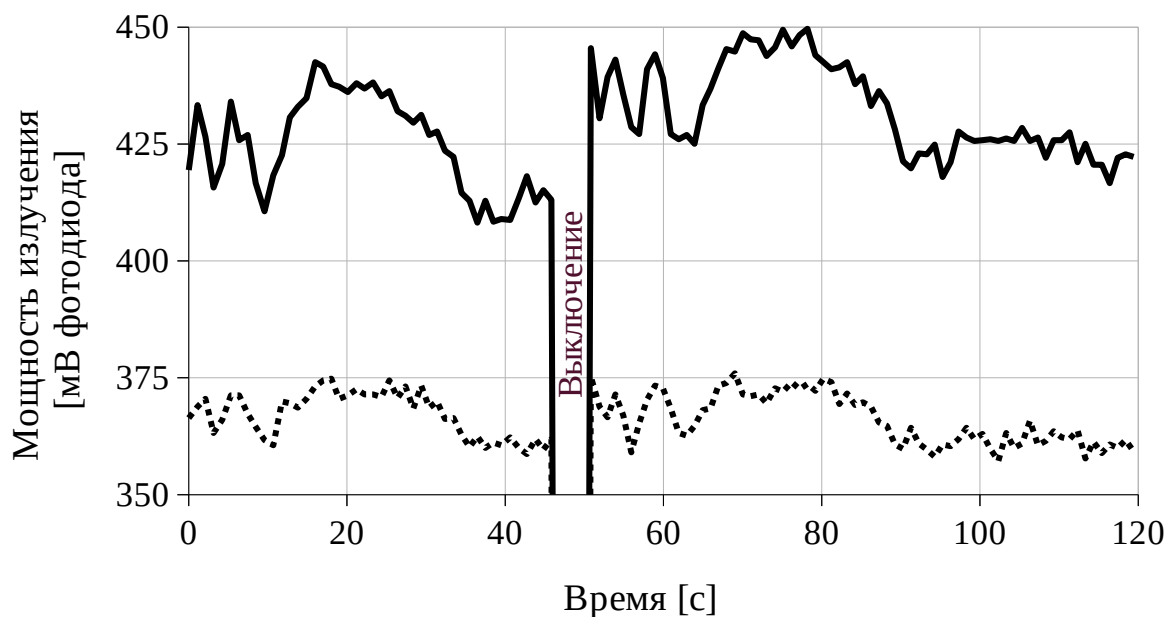


Рисунок 24 — Динамика мощности люминесценции для одной области в течение 2 минут. Пунктирная линия — показания фотоприёмника-эталона.

Обратно рассеянное излучение от поверхности заготовки

При измерениях была выявлена проблема насыщения фотоприёмника-эталона обратно рассеянным излучением накачки. Вероятно природа этого заключается в рэлеевском рассеянии и френелевском отражении. Эмпирическим путём было обнаружено, что степень засветки зависит от диаметра измеряемой заготовки.

Был проведён эксперимент с измерениями мощности на фотоприёмнике, измеряющем накачку. Диод в течение 2 часов прогревался до установления стационарного режима. В качестве эталонного значения бралось измерение мощности без заготовки (усреднение по 250 точкам в течение минуты). После таким же образом проводились измерения при нахождении в схеме попеременно 6 пассивных заготовок разных диаметров. Далее вычислялось, во сколько раз больше измерение фотоприёмника-эталона по отношению к холостому измерению

без заготовки (см. рисунок 25).

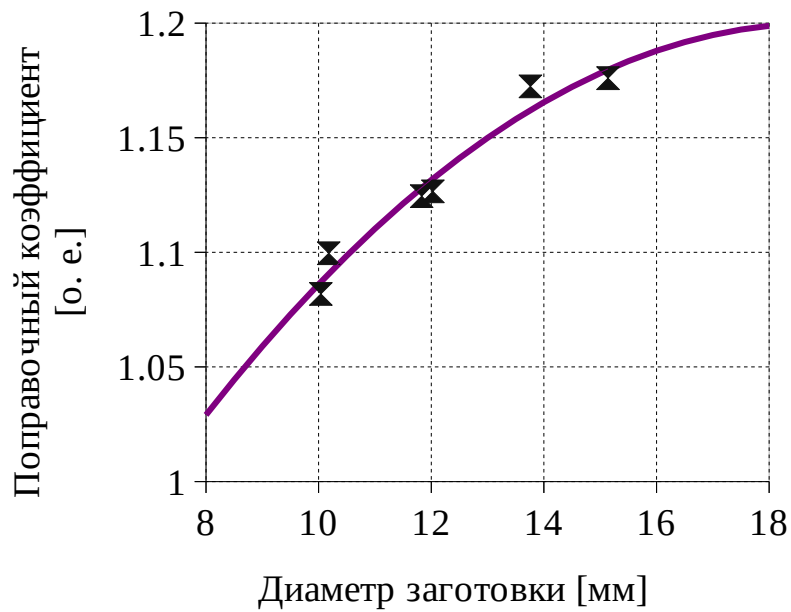


Рисунок 25 — Прирост мощности эталонного канала вследствие френелевского отражения от поверхности заготовка как функция от её диаметра.

Аппроксимирующая линия второй порядка

Функция поправочного в зависимости от диаметра заготовки:

$$\kappa(D) = -0.0014 D^2 + 0.0544 D + 0.6858 \quad .$$

Тогда скорректировать мощность можно следующим образом:

$$P'_{pump} = \frac{P_{pump}}{\kappa(D)} \quad .$$

3.2.2. Масштабирование измерений с помощью заготовки-эталона

Измерение концентрации

Измерение концентрации активных ионов ручного исполнения происходило в показаниях фотоприёмника [мВ]. Такие значения в условных единицах также могут использоваться на производстве как показатель однородности распределения примеси.

Но стоит отметить важность для производства сравнение заготовок друг с другом. Поэтому измерение концентрации в характерных для неё единицах ([ppm] или [1/м³]) осталось первостепенной задачей.

Заготовка-эталон в составе автоматизированной системы

В качестве решения этой проблемы было предложено внедрить в систему измерения заготовку-эталон с известной концентрацией (см. рисунок 26). С точки зрения производства, это продукт, изготовленный на той же линии ,с тем же диаметром и составом стеклообразующей массы.

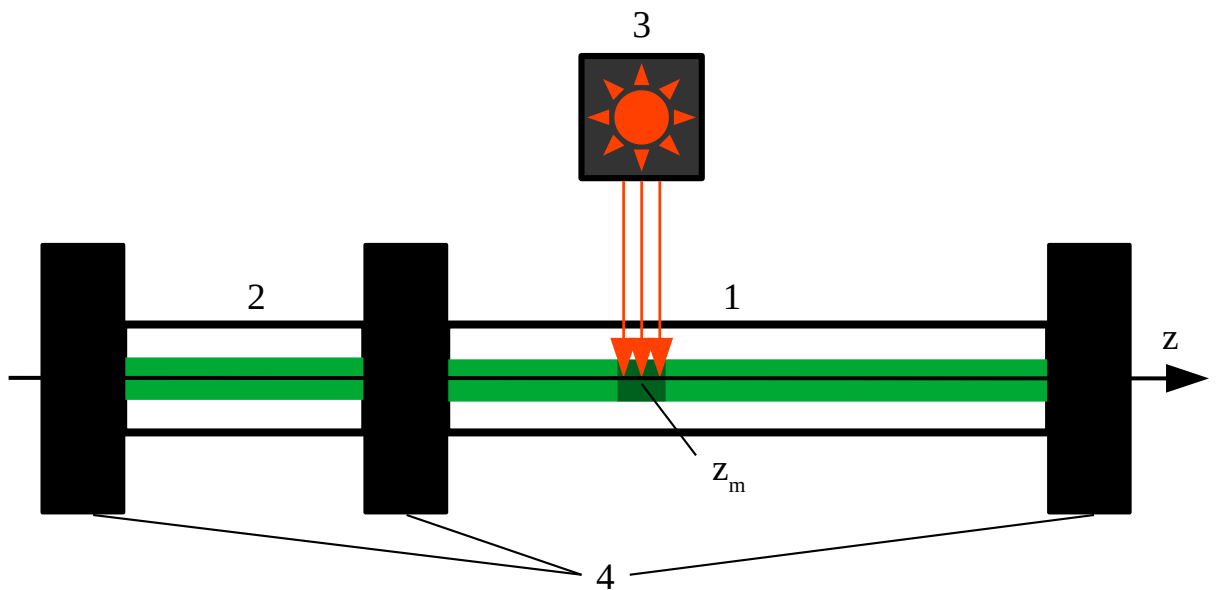


Рисунок 26 — Система заготовки-эталоны. 1 — измеряемая заготовка, 2 — заготовка-эталон, 3 — лазерный диод накачки, 4 — крепления

Чтобы определить концентрацию эталона, заранее была изготовлена заготовка с высокой степенью однородности и рассекалась на 3 части. Две крайних части исследовались рентгеноскопическим методом как эталонным, в некоторых случаях — химическим травлением. Полученные концентрации усреднялись и результат считался эталонным.

Используя результаты математической модели, можно получить соотношение мощности люминесценции для измеряемой области — $P \sim C$ и для заготовки-эталоны — $P_{standart} \sim C_{standart}$.

Таким образом, наличие заготовки-эталоны позволяет нам измерить концентрацию активной примеси в этой области:

$$C = C_{standart} \frac{P}{P_{standart}} .$$

3.2.3. Метод управления

На основе данных расчётов представлен метод управления технологическим процессом изготовления заготовок активных волоконных световодов, заключающийся в расчёте локальной концентрации активных ионов и компенсаций вносимых в измерения искажений, реализующий следующие этапы действий посредством специального программного обеспечения:

1. Измерение заготовки-эталона:

Этап 1: Фиксация диаметра заготовки-эталона $d_{standart}$;

Этап 2: Измерение мощности люминесценции заготовки-эталона $P_{1standart}$;

Этап 3: Измерение эталонной мощности для заготовки-эталона $P_{2standart}$;

Этап 4: Фиксация концентрации заготовки эталона $C_{standart}$.

2. Измерение измеряемой заготовки (с координатой поперечного сечения z в момент измерения t):

Этап 1: Фиксация диаметра измеряемой заготовки d ;

Этап 2: Измерение мощности люминесценции измеряемой заготовки $P_1(z, t)$;

Этап 3: Измерение эталонной мощности для измеряемой заготовки $P_2(z, t)$.

3. Расчёты:

Этап 1: Корректировка эталонной мощности при заготовке-эталоне

$$P'_{2standart} = \frac{P_{2standart}}{\kappa(d_{standart})} \quad (\kappa(d) \text{ — функция поправочного коэффициента});$$

Этап 2: Нормировка мощности люминесценции заготовки-эталона по

опорному каналу $P'_{1standart} = \frac{P_{1standart}}{P'_{2standart}}$;

Этап 3: Корректировка эталонной мощности при измеряемой заготовке

$$P'_2(z, t) = \frac{P_2(z, t)}{\kappa(d)} ;$$

Этап 4: Нормировка мощности люминесценции измеряемой заготовки по

опорному каналу $P'_1(z) = \frac{P_1(z, t)}{P'_2(z, t)}$;

Этап 5: Расчёт концентрации в указанном сечении заготовки

$$C(z) = C_{standart} \frac{P'_1(z)}{P'_{1standart}} .$$

Структура вычислений представлена на рисунке 27.

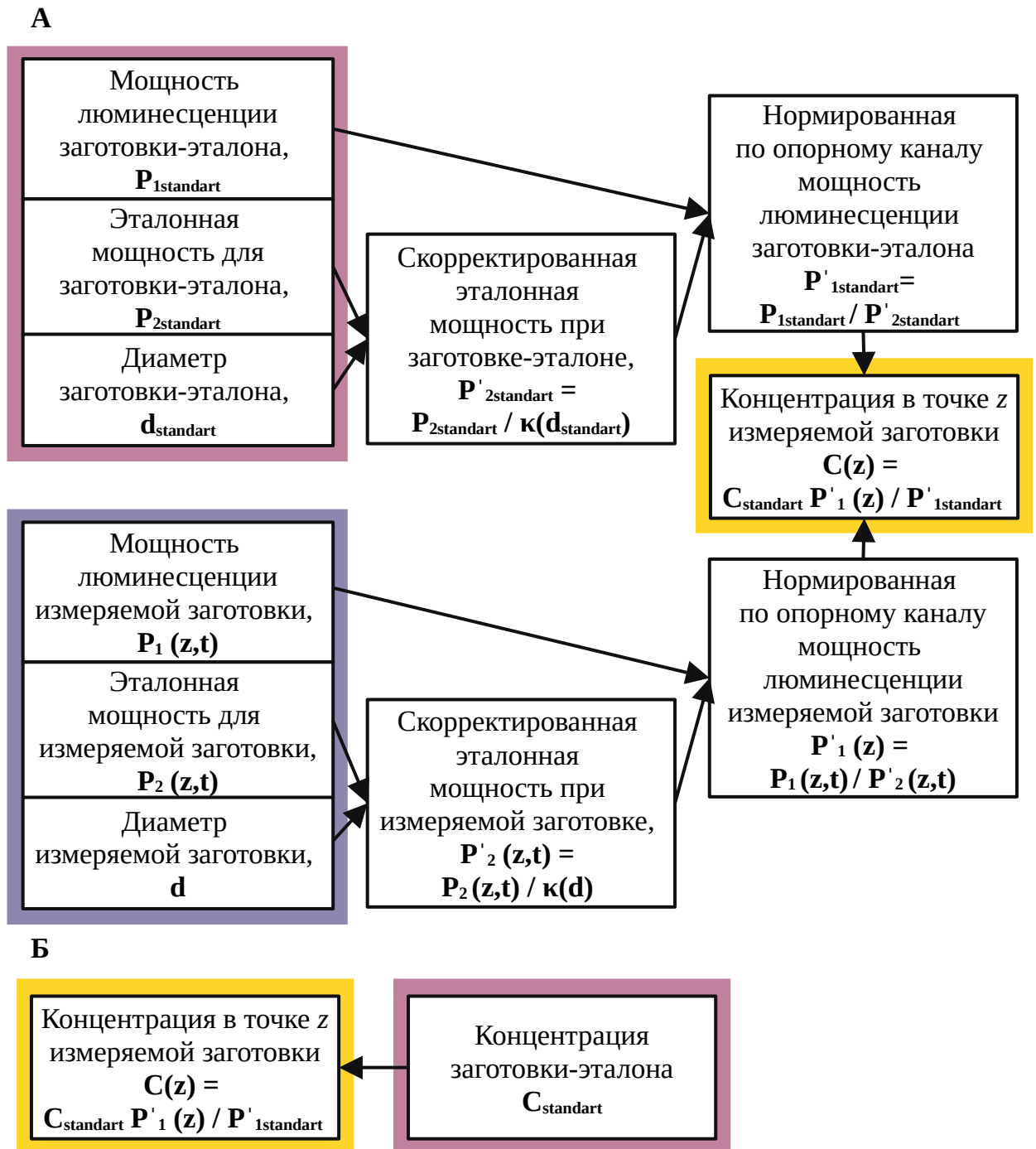


Рисунок 27 — Структура вычислений специального программного обеспечения. А — модуль компенсации данных посредством замера мощности диода. Б — модуль расчёта концентрации с помощью заготовки-эталона

3.3. Автоматизированная система исследования однородности концентрации активной примеси вдоль заготовки волоконного световода

3.3.1. Техническое исполнение

В рамках работы создана автоматизированная система управления процессом исследования однородности концентрации активной примеси вдоль заготовки волоконного световода (ErGO) [8][14][40][41]. Главными задачами этого комплекса являлись уменьшение влияния человеческого фактора на результаты измерений, иначе повышение повторяемости, и ускорение процесса измерения.

На рисунке 28 изображена разработанная автоматизированная система. Сигналы управления и сигналы обратной связи передаются на персональный компьютер через микроконтроллер. Остальную часть комплекса можно абстрагировать до трёх подсистем:

1. Система двигателей, позволяющих механически перемещать заготовку. Ось X («от читателя»-«к читателю») — перемещает заготовку под неподвижным диодом накачки, ось Y (верх-вниз) — перемещает фотоприёмник PD_L, ось Z (влево-вправо) — перемещает заготовку в системе накачка-фотоприёмник, меняя измеряемый срез заготовки (более подробная ориентация осей изображена на рисунке 36).

2. Система концевых выключателей, которая сигнализирует о достижении предельного значения хода двигателей.

3. Система накачки-люминесценции, которая состоит из диода накачки, оптической схемы, обеспечивающей работы фотоприёмника-эталона, и фотоприёмника, контролирующего мощность люминесценции. Также работа этих компонентов обеспечивается драйвером диода и АЦП с усилительными схемами.

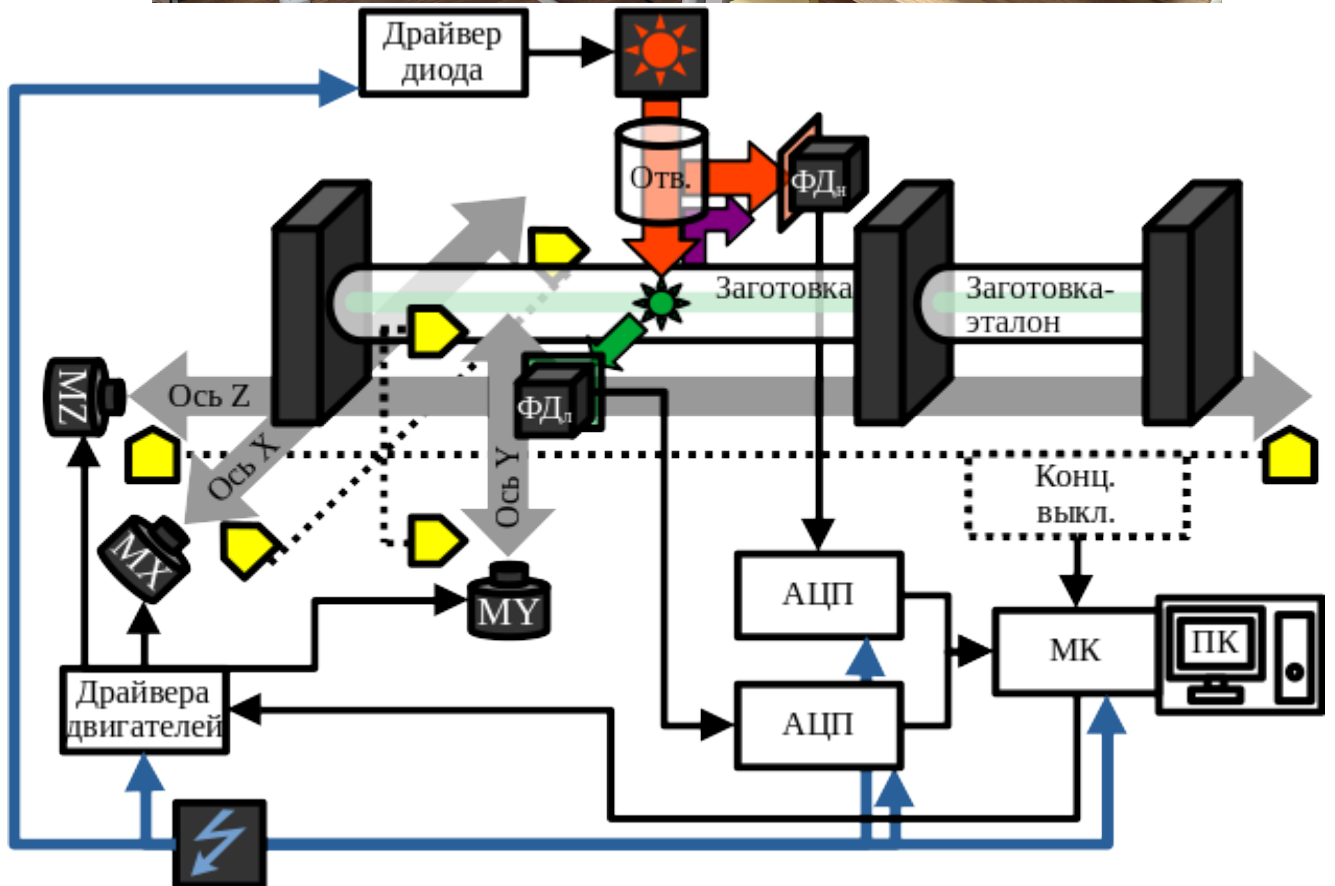


Рисунок 28 — ВВЕРХУ: Автоматизированная система. ВНИЗУ: структура автоматизированной системы M_x , M_y , M_z - шаговые двигатели трех степеней свободы системы, PO — рэлеевский ответвитель, конц. выкл. — система концевых выключателей, PD_L — диод, фиксирующий люминесценцию, PD_P — диод, фиксирующий рассеянное излучение накачки, $МК$ - микроконтроллер, $ПК$ - персональный компьютер

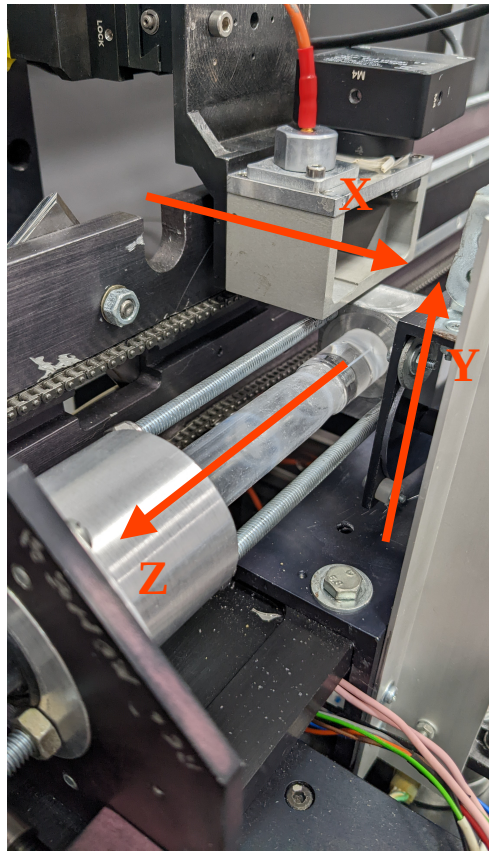
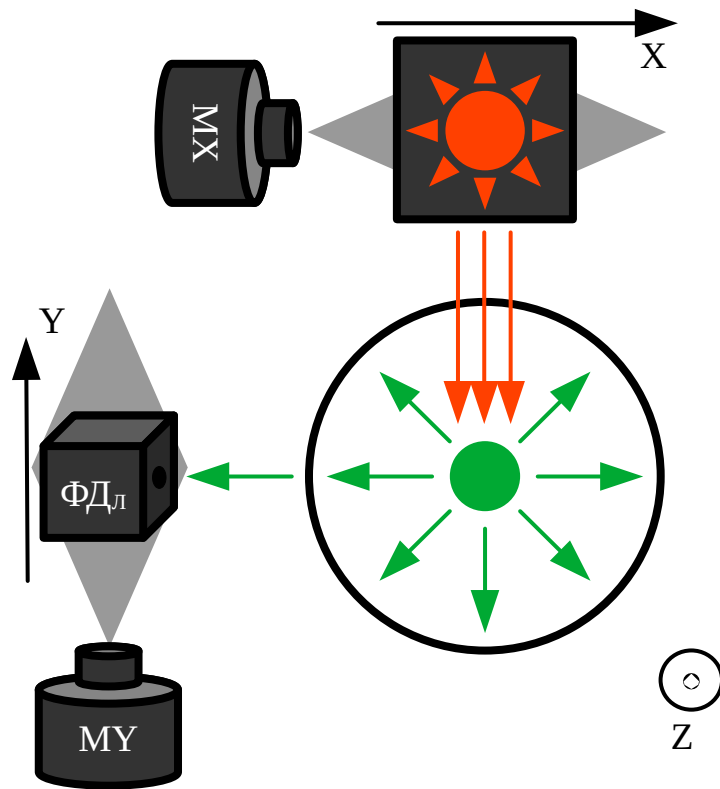


Рисунок 29 — ВВЕРХУ: ориентация осей в поперечном сечении заготовки.
ВНИЗУ: фотография эталонной заготовки в измерительной системе с
обозначением осей

К неупомянутым частям стоит отнести систему питания и основание с защитным (от излучения лазерного диода накачки) кожухом.

3.3.2. Система управления

Система управления [117] представляет собой совокупность сигналов управления и сигналов обратной связи, которые возникают в ней в процессе измерения (см. рисунок 30).

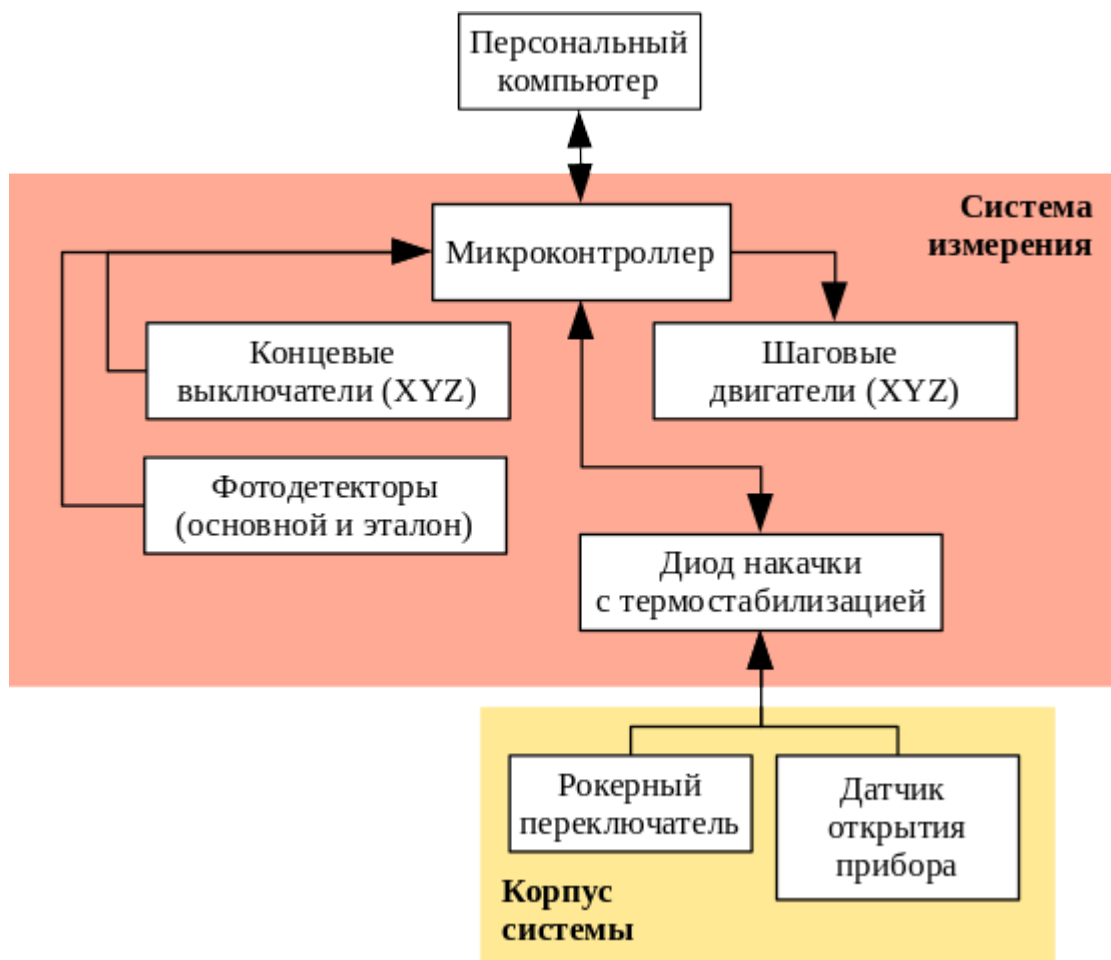


Рисунок 30 — Система управления измерением однородности концентрации активной примеси вдоль длины заготовки

В качестве сенсорной части выступают термодатчики на диоде накачки, концевые выключатели, фотоприёмники.

Сигналы управления посылаются на диод накачки (увеличение-уменьшение мощности), шаговые двигатели.

Все сигналы являются цифровыми сигналами (командами) ПК через последовательный порт, которые в дальнейшем обрабатываются микроконтроллером.

3.3.3. Алгоритм измерений концентрации активной примеси

Первый этап подготовки включает в себя:

1. Проверку работоспособности двигателей и остальных подсистем.
2. Ввод оператором входных параметров: диапазон измерений, диаметр заготовки и так далее (пример файла калибровки представлен в Приложении 1).
3. Автоматическая настройка на заготовку-эталон с часовым прогревом диода.
4. Проведение измерений по срезам заготовки согласно указанным настройкам.

Система посредством сигналов управления настраивает измеряемую область заготовки с помощью двигателя MZ. Далее с помощью двигателей MY, MX система настраивается на указанные координаты сердцевины (см. рисунок 31). После программа осуществляет 50 измерений в течение нескольких секунд и усредняет их.

Полученные данные и данные заранее измеренной заготовки-эталоны обрабатываются с помощью программно-математического модуля и фиксируются в файле измерений (см. приложение 1).

Таким образом, удаётся достигнуть повторяемости ввиду отсутствия влияния человека на точную настройку координат компонентов.

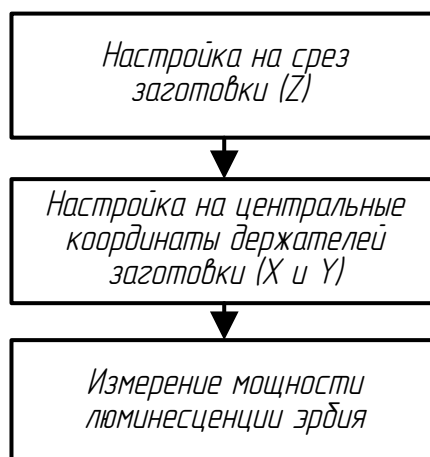


Рисунок 31 — Упрощённый алгоритм измерения концентрации активных ионов в сердцевине среза заготовки волоконного световода

3.3.4. Программное обеспечение

Программное обеспечение [127] системы управления представляет собой программу ErGO System (см. рисунок 32) и прошивку микроконтроллера. Программное обеспечение разработано на языке C# (С-подобный язык — у прошивки) с использованием объектно-ориентированного и процедурного программирования.

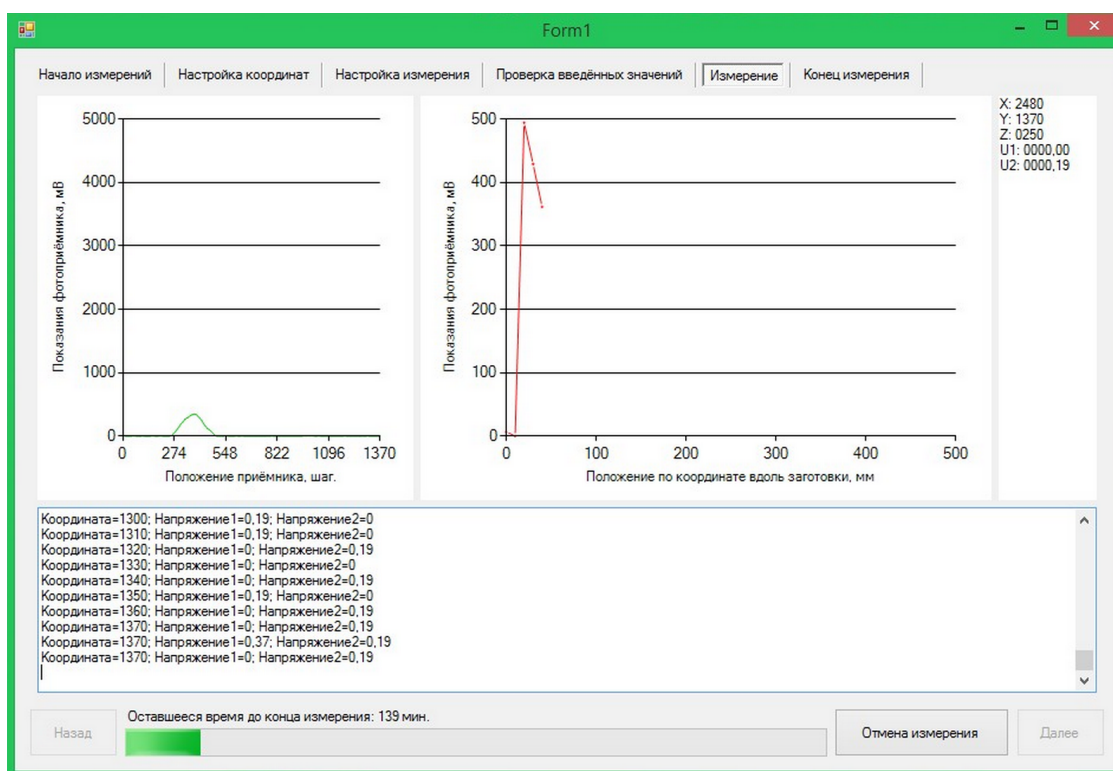


Рисунок 32 — Снимок графического интерфейса программы ErGO System

3.4. Автоматизированная система научных исследований профиля концентрации заготовки

3.4.1. Алгоритм измерений

Для более детального исследования заготовок в рамках научных исследований существующая программно-аппаратная система усовершенствована. Основное отличие здесь заключается в добавлении нового алгоритма измерений, использующего систему обратной связи (ФДл) для подстройки координат на сердцевину посредством поиска максимальной люминесценции методом дихотомии.

Такой подход позволяет настроиться на реальную сердцевину, тем самым повышая точность и повторяемость результатов.

Реализован режим томографии, который позволяет после настройки

компонентов на сердцевину заготовки провести обход фотоприёмником по оси Y . Ввиду того, что заготовки, произведённые методом MCVD, обладают осесимметричностью по профилю концентрации примесей, таким обходом можно получить более информативный массив данных о осаждении активной примеси в заготовке.

Упрощённый алгоритм для измерения одного сечения отображён на рисунке 33. Такой промер дополняет уже существующий порядок измерений, тем самым не изменяя аппаратную составляющую автоматизированной системы управления.

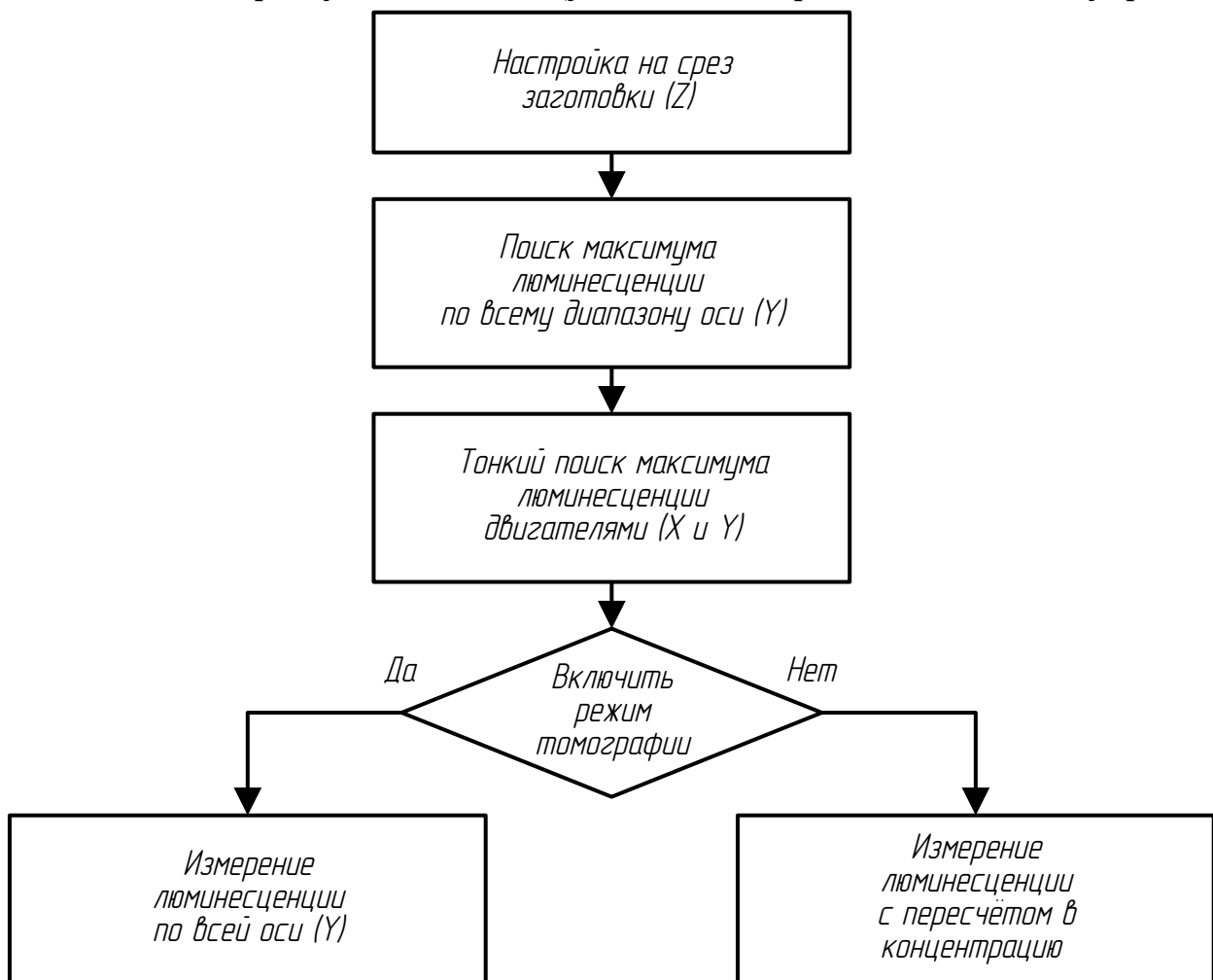


Рисунок 33 — Упрощённый алгоритм измерения с при использовании сигналов обратной связи

3.4.3. Программное обеспечение (режим измерений)

Программная составляющая автоматизированной системы научных исследований была реализована в виде дополнительного программного пакета к существующему ПО ErGO System.

3.5. Краткие выводы по главе 3

На основе выявленных закономерностей разработано специальное программное обеспечение, позволяющее в процессе измерений компенсировать флуктуации мощности источника излучения накачки с помощью эталонных измерений. Разработана автоматизированная система исследования однородности концентрации активной легирующей примеси вдоль длины заготовки волоконного световода, способная настраиваться на сердцевину оптическими элементами, тем самым учитывая возможное расхождение сердцевины с геометрической осью цилиндрической поверхности заготовки.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИСПЫТАНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ

4.1. Адекватность получаемых результатов

Проверка адекватности результатов, получаемых на автоматизированной системе с включённым поиском сердцевин и программно-математическим модулем происходило с помощью эталонной сертифицированной методики Оже-спектроскопии.

Из заранее измеренной заготовки были получены небольшие цилиндрические фрагменты, которые после измерялись на сертифицированном приборе. Результаты сравнения двух методов представлены на рисунке 34. Расхождение между трендами результатов измерений не превышает 5%. Таким образом, можно считать, что автоматизированная система, реализующая предложенную методику предоставляет адекватные данные, которые согласуются с другими методиками.

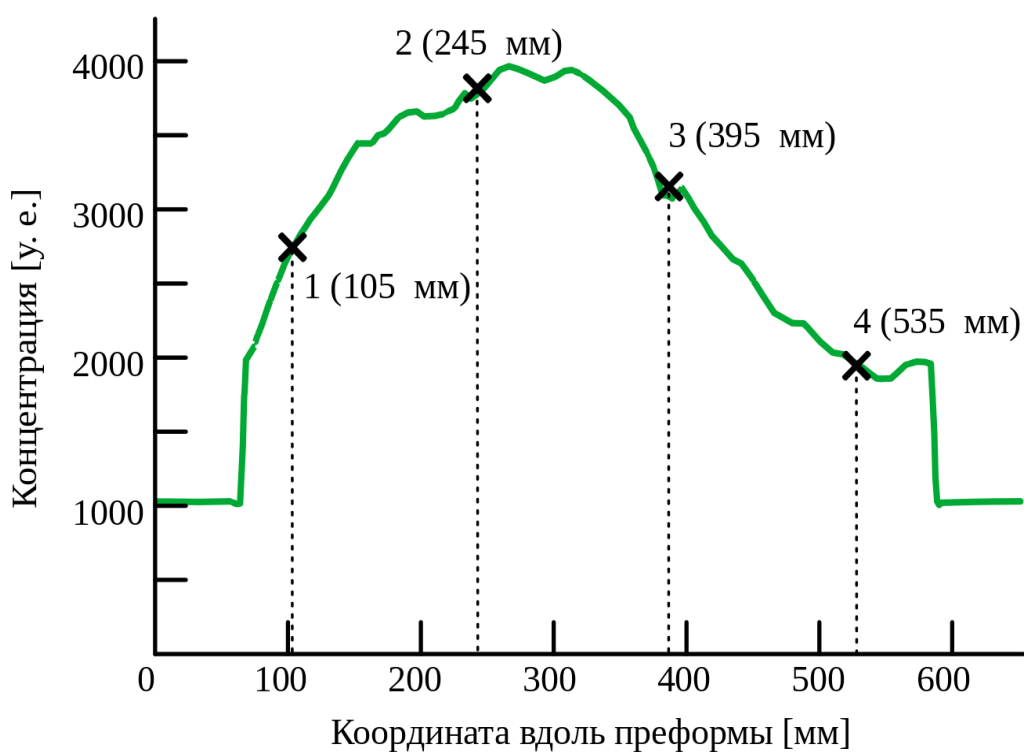


Рисунок 34 — Данные об измерении концентрации активной примеси в преформе волоконного световода. Линия — измерения, полученные рассматриваемой автоматизированной системой. Отмеченные участки — измеренные разрушающим рентгеноскопическим методом цилиндрические фрагменты преформы

4.2. Измерение распределения концентрации активной примеси в стандартном режиме

В результате эксплуатации системы был проведён тестовый эксперимент по измерению специально изготовленной заготовки. Опыты были проведены при разных ориентациях заготовки (вокруг геометрической оси) и в разные дни (см. рисунок 35).

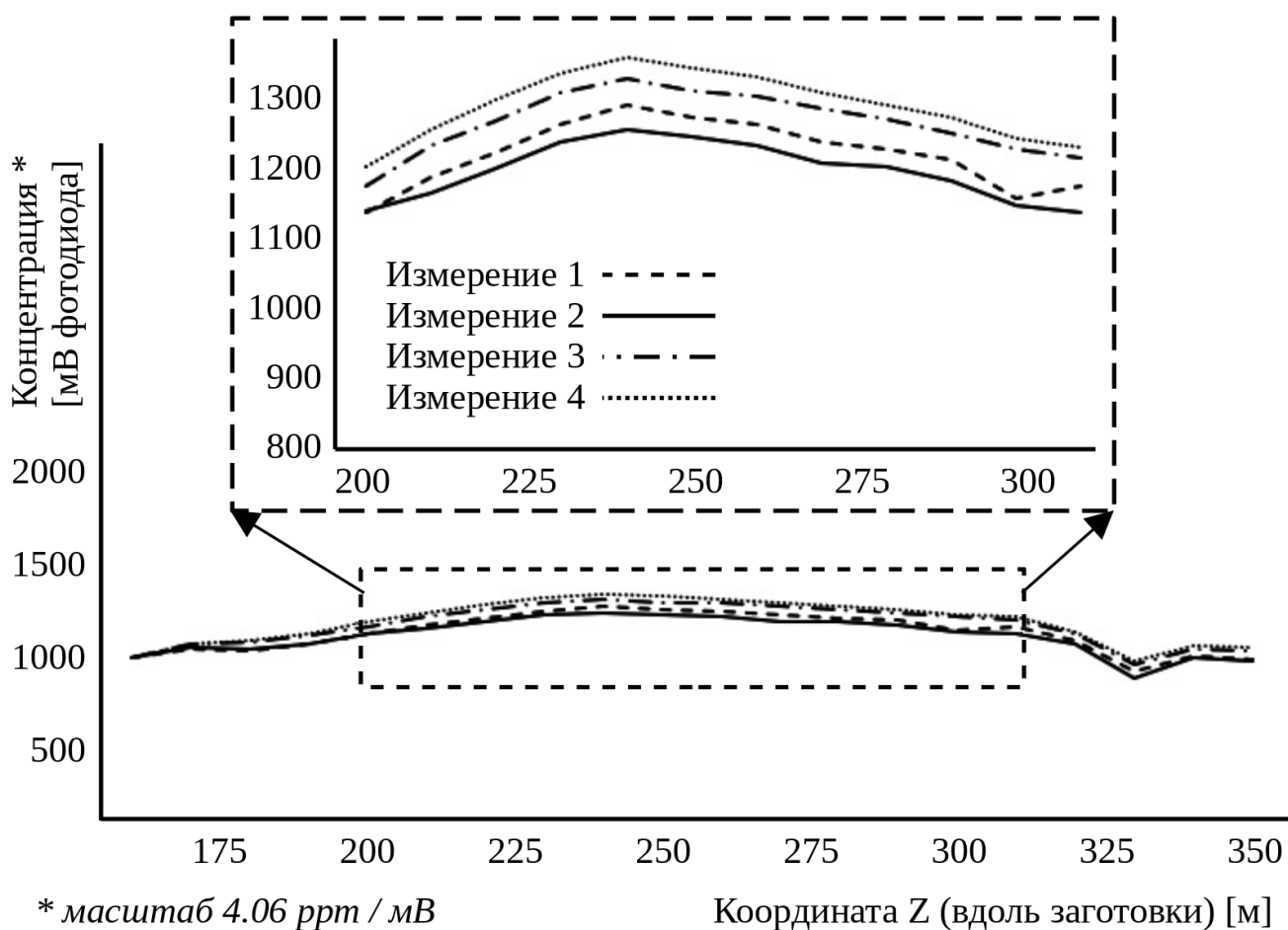


Рисунок 35 — Четыре измерения одной заготовки при разных условиях

Доля отклонения измерений от среднего значения не превышает 4.36% , что говорит о повторяемости получаемых результатов. [117]

4.3. Томографические измерения распределения концентрации активной примеси в осевых сечениях заготовки

Режим томографии также был протестирован на автоматизированной системе научных исследований. В результате был получен массив данных о концентрации активной примеси для одного осевого среза заготовки с шагом 10 мкм по координате Y.

Пример такого измерения представлен на рисунке 36. Ширина «хребта»

определена профилем концентрации активной примеси.

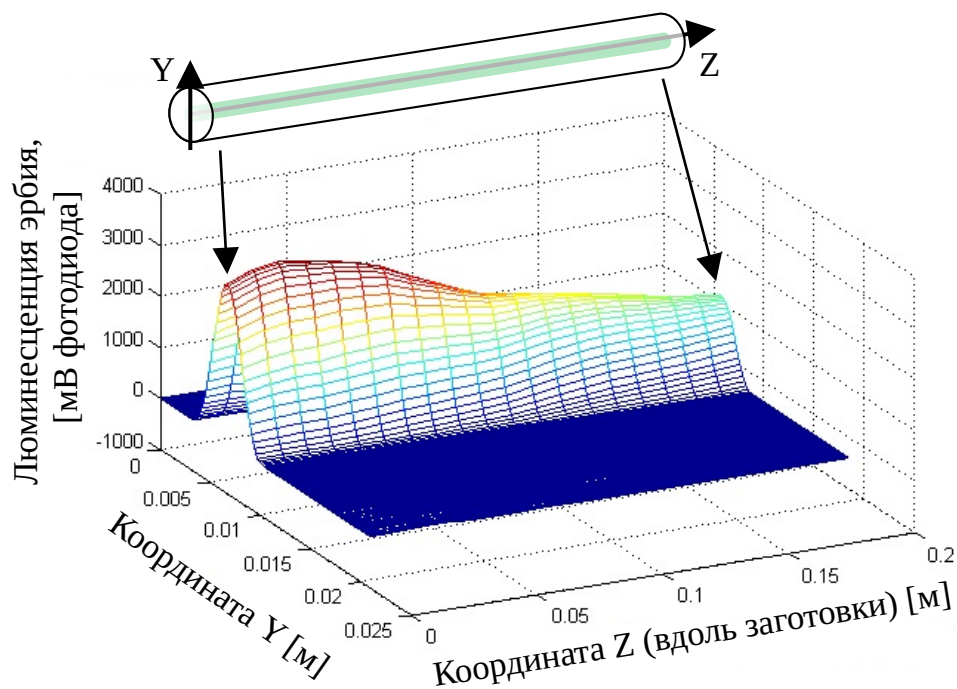


Рисунок 36 — Результат томографии заготовки активного волоконного световода

4.4. Внедрение

Результаты настоящих исследований были внедрены в производственный процесс (ПНППК, см. приложение 3) в качестве промежуточного контроля качества заготовок, что позволило отбраковывать некондицию на ранних этапах.

Также результаты исследований были внедрены в научно-исследовательскую деятельность (ПФИЦ УрО РАН, см. приложение 3). Результаты томографии помогают более подробно изучить качество осаждения ионов в процессе изготовления и оценить корректность технологического режима.

В третьих, автоматизированная система используется в образовательном процессе (ПНИПУ, см. приложение 3) при обучении студентов на производственной практике.

4.5. Краткие выводы по главе 4

Сконструированная автоматизированная система неразрушающего контроля заготовок активных волоконных световодов показала согласованность 5% с другим методом измерения концентрации примесей (Оже-спектроскопия). Погрешность результатов измерения не превышает 4.36%, при более чем 20% расхождении данных у неавтоматизированных измерений, что подтверждает целесообразность автоматизации методики.

На основе предложенной методики разработана автоматизированная система научных исследований, позволяющая контролировать профиль концентрации активной примеси в осевом сечении заготовки с шагом 10 мкм.

Рассмотренные системы были внедрены на производстве, в научно-исследовательский процесс. Автоматизация методик позволяет на настоящий день отбраковывать на ранних этапах производства некондиционные заготовки и оценивать корректность технологического режима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и верифицирована математическая модель люминесценции сердцевины заготовки активного волоконного световода при боковой накачке в безымерсионной среде.

2. На основе разработанной модели и экспериментов получен ряд зависимостей, характерных для цилиндрической заготовки, которые позволяют определять концентрацию активной примеси и повышать точность таких измерений вдвое в сравнении с неавтоматизированными измерениями.

3. На основе выявленных зависимостей разработан метод управления технологическим процессом изготовления активных волоконных световодов, позволяющий компенсировать флуктуации мощности источника излучения накачки с помощью эталонных измерений, что даёт 5% согласованности измерений с другими сертифицированными методиками.

4. Сконструирована автоматизированная система неразрушающего контроля распределения концентрации активной легирующей примеси, учитывающая возможное расхождение между оптической осью заготовки и центром сердцевины подстройкой оптических элементов, которая позволила оперативно отбраковывать некондиционный продукт и удешевила производство на стадии отработки технологии на 29% , в ходе серийного изготовления продукции — на 6% .

5. На основе предложенного алгоритма разработана автоматизированная система научных исследований, которая осуществляет томографические измерения концентрации примеси в осевом сечении заготовки волоконного световода и минимум на порядок повысить пространственное разрешение визуализации структуры осаждённого активного слоя в сравнении с использовавшимся до этого методом.

Список сокращений и условных обозначений

TR^{2+} , TR^{3+} — редкоземельный металл в зарядовом состоянии.

РЗЭ — редкоземельный элемент

РЗИ — редкоземельный ион

ИК — инфракрасный

УФ — ультрафиолетовый

ВС — волоконный световод/волоконные световоды

МК — микроконтроллер

ПК — персональный компьютер

Список литературы

1. Abedin, S. A Textile Embedded with Distributed Fiber Optic Sensors for Pedestrian Bridge Monitoring / S. Abedin, A. M. Biondi, L. Cao, R. Wu, T. Yu, X. Wang // *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*. - 2023. - №. 433. - C. 689-695. - DOI 10.1007/978-3-031-39117-0_70.
2. Antipov, S. O. A Holmium-doped fiber amplifier at 2.1 μm / S. O. Antipov, A. S. Kurkov // *Laser Physics Letters*. - 2013. - №10. - C. 1-3. - DOI 10.1088/1612-2011/10/12/12510.
3. Augustyn, E. Comparison of selected optical properties of oxyfluoride glass fibers doped with Er^{3+} and co-doped with Er^{3+} Yb^{3+} // E. Augustyn, P. Stremplewski, M. Rozanski, C. Koepke, G. Dominiak-Dzik, M. Kępińska, M. Żelechower // *Lasers And Optics*. - 2011. - № 105. - C. 933-940. - DOI 10.1007/s00340-011-4578-0.
4. Bachim, B. L. Automated flexure testing of axially rotated optical fiber gratings / B. L. Bachim, T. K. Gaylord // *The Review of scientific instruments*. - 2002. - №73(10). - C. 3454-3457. - DOI 10.1063/1.1505660.
5. Bai, X. Hybrid double-cladding Er/Yb co-doped fiber amplifier with Yb-ASE suppression / X. Bai, C. Tian, X. Chen, M. Wang // *Optical Fiber Technology*. - 2022. - №74. - C. 103124. - DOI 10.1016/j.yofte.2022.103124.
6. Becker, M. W. Distributed Acoustic Sensing (DAS) as a Distributed Hydraulic Sensor in Fractured Bedrock / M. W. Becker, T. I. Coleman, C. C. Ciervo // *Water Resources Research*. - №56(9). - DOI 10.1029/2020WR028140.
7. Belogorokhov, I. A. Optical properties of organic semiconductors based on erbium phthalocyanine complexes in the mid- and near-infrared spectral regions / I. A. Belogorokhov, E. V. Tikhonov, M. O. Breusova, V. T. Pushkarev, L. G. Tomilova, D. R. Khokhlov // *Semiconductors*. - 2007. - № 10 (41). - C. 1204-1208. - DOI 10.1134/S1063782607100156.

8. Belokrylov, M. E. An All-Fiber Time Domain Reflectometer For Measuring The Length Of Active Erbium Doped Optical Fibers / M. E. Belokrylov, Y. A. Konstantinov, K. P. Latkin, Claude D., V. A. Shcherbakova, D. A. Seleznev, A. A. Stepin, Y. A. Konin, R. R. Kashina // Instruments and Experimental Techniques. - 2020. - T. 63. №4. - C. 481-486. - DOI 10.1134/S0020441220050012.

9. Belokrylov, M. E. Method for Increasing the Signal-to-Noise Ratio of Rayleigh Back-Scattered Radiation Registered by a Frequency Domain Optical Reflectometer Using Two-Stage Erbium Amplification / M. E. Belokrylov, D. Claude, Yu. A. Konstantinov, P. V. Karnaushkin, K. A. Ovchinnikov, V. V. Krishtop, D. G. Gilev, F. L. Barkov, R. S. Ponomarev // Instruments and Experimental Techniques. - 2023. - №66(5). - C. 761-768. - DOI 10.1134/S0020441223050172.

10. Belostotsky, V. Ion-exchange processes in silicate glasses: the role of oxygen / Vladimir Belostotsky // Journal of Non-Crystalline Solids. - 1998. - №238. - C. 171-174. - DOI 10.1016/S0022-3093(98)00717-0.

11. Bhadra, S. K. Automated optical manufacturing test system for high power multi- bar diode modules / S. K. Bhadra, C. Humble, H. Nguyen, G. Treusch, R. Pandey, J. Bell // Intelligent Systems in Design and Manufacturing VI. - 2005. - №5999. - C. 599900. - DOI 10.1117/12.630729.

12. Bresler, M. S. Effective Excitation Cross Section of Erbium in Amorphous Hydrogenated Silicon under Optical Pumping / M. S. Bresler, O. B. Gusev, P. E. Pak, E. I. Terukov, I. N. Yassievich // Semiconductors and Dielectrics. - 2001. - № 4 (43). - C. 625-628. - DOI 10.1134/1.1365982.

13. Bünzli, J.-C. G. New Opportunities for Lanthanide Luminescence / J.-C. G. Bünzli, S. Comby, A.-S. Chauvin, C. D. B. Vandevyver // Journal of Rare Earths - 2007. - № 25. - C. 257-274. - DOI 10.1016/S1002-0721(07)60420-7.

14. Burdin, V. V. Multistage Quality Control Of Active Fiber Light Guides / V. V. Burdin, Y. A. Konstantinov, Claude D., K. P. Latkin, M. E. Belokrylov, A. I. Krivosheev,

M. K. Tsibinogina // Instruments and Experimental Techniques. - 2021. - T. 64. №5. - C. 768-775. - DOI 10.1134/S0020441221050031.

15. Cai, M. R₂O₃ (R = La, Y) modified erbium activated germanate glasses for mid-infrared 2.7 μm laser materials / M. Cai, B. Zhou, F. Wang, T. Wei, Y. Tian, J. Zhou, S. Xu, J. Zhang // Scientific Reports. - 2015. - № 5. - C. 13056. - DOI 10.1038/srep13056.

16. Chen, F. Investigation of mid-infrared emission characteristics and energy transfer dynamics in Er³⁺ doped oxyfluoride tellurite glass / F. Chen, T. Wei, X. Jing, Y. Tian, J. Zhang, S. Xu // Scientific Reports. - 2015. - № 5. - C. 10.1038. - DOI 10.1038/srep10676.

17. Chen, X. Fast Feature Extraction Method for Brillouin Scattering Spectrum of OPGW Optical Cable Based on BOTDR / X. Chen, H. Yu // Sensors. - 2023. - №23(19). - C. 8166. - DOI 10.3390/s23198166.

18. Chopard, A. Automated sulfides quantification by multispectral optical microscopy / A. Chopard, P. Marion, J.-J.Royer, R. Taza, H. Bouzahzah, M. Benzaazoua // Minerals Engineering. - 2019. - №131. - C. 38-50. - DOI 10.1016/j.mineng.2018.11.005.

19. Dai, X. Mesoporous SiO₂ Nanoparticles: A Unique Platform Enabling Sensitive Detection of Rare Earth Ions with Smartphone Camera / X. Dai, K. D. Rasamani, F. Hu, Y. Sun // Nano-Micro Letters. - 2018. - №10(55). - DOI 10.1007/s40820-018-0208-2.

20. Desurvive, E. Design Optimization for Efficient Erbium-Doped Fiber Amplifier / E. Desurvive, J. L. Zyskind, C. R. Giles // Journal of Lightwave Technology. - 1990. - № 11 (8). - C. 1730-1741. - DOI 10.1109/50.60573.

21. Dianov, E. M. Germania-Based Core Optical Fibers / E. M. Dianov, V. M. Mashinsky // Journal of Lightwave Technology. - 2005. - Vol. 23, №11. - C. 3500- 3508. - DOI 10.1109/JLT.2005.855867.

22. Douglass, A. S. Performance of distributed acoustic sensing relative to co-located hydrophone measurements / A. S. Douglass, S. Abadi // The Journal of the Acoustical Society of America. - 2023. - №154. - С. A176. - DOI 10.1121/10.0023179.

23. Dyakov, S. A. Specific Features of Erbium Ion Photoluminescence in Structures with Amorphous and Crystalline Silicon Nanoclusters in Silica Matrix / S. A. Dyakov, D. M. Zhigunov, V. Yu. Timoshenko // Semiconductors. - 2010. - №44(4). - С. 467-471. - DOI 10.1134/S106378261004010X.

24. Dyakov, S. A. Specific Features of Erbium Ion Photoluminescence in Structures with Amorphous and Crystalline Silicon Nanoclusters in Silica Matrix / S. A. Dyakov, D. M. Zhigunov, V. Yu. Timoshenko // Semiconductors. - 2010. - № 4 (44). - С. 467-471. - DOI 10.1134/S106378261004010X.

25. Fayyaz, A. Analysis of Rare Earth Ores Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy and Laser Ablation Time-of-Flight Mass Spectrometry / A. Fayyaz, R. Ali, M. Waqas, U. Liaqat, R. Ahmad, Z. A. Umar, M. A. Baig // Minerals. - 2023. - №13(6). - С. 787. - DOI 10.3390/min13060787.

26. Feng, Y. Absorption measurement errors in single-mode fibers resulting from re-emission of radiation / Y. Feng, B. M. Zhang, J. Zhao, S. Zhu, J. Price, L. Nilsson [Электронный ресурс] // University of Southampton Institutional Repository. - 2016. - URL: <http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/402866> (дата обращения: 01.04.2024). - DOI 10.5258/SOTON/402866.

27. Gastev, S. V. Effective Cross Section for Photoluminescence Excitation and Lifetime of Excited Er³⁺ Ions in Selectively Doped Multilayer Si:Er Structures / S. V. Gastev, A. M. Emel'yanov, N. A. Sobolev, B. A. Andreev, Z. F. Krasil'nik, V. B. Shmagin // Semiconductors. - 2003. - №37(9). - С. 1100-1103.

28. Gentz, R. Workflow Automation in Liquid Chromatography Mass Spectrometry / R. Gentz, H. G. Martin, E. Baidoo, S. Peisert // 15th International Conference on eScience (eScience): материалы конференции, 2019, San Diego - San

Diego, 2019. - C. 638-639. - DOI 10.1109/eScience.2019.00095.

29. Ghiggino, K. P. Fluorescence lifetime measurements using a novel fiber-optic laser scanning confocal microscope / K. P. Ghiggino, M. R. Harris, P. G. Spizziri // Review of Scientific Instruments. - 1992. - №63(5). - C. 2999. - DOI 10.1063/1.1142599.

30. Hamzah, A. E. Advancing the measurement speed and accuracy of conventional BOTDA fiber sensor systems via SoC data acquisition / A. E. Hamzah, A. A. Bakar, M. M. Fadhel, N. M. Sapiee, M. M. Elgaud, M. E. Hamzah, A. S. K. Almoosa, N. F. Naim, M. H. H. Mokhtar, S. H. M. Ali, N. Arsad., M. S. D. Zan // Optical Fiber Technology. - 2024. - №84(5). - C. 103712. - DOI 10.1016/j.yofte.2024.103712.

31. Han, S. MW peak power Er/Yb-doped fiber / S. Han, H. Jang, S. Kim, Y. Kim // Laser Physics Letters. - 2017. - №14. - C. 080002. - DOI 10.1088/1612-202X/aa7c91.

32. Harun, S. W. High Output Power Erbium-Ytterbium Doped Cladding Pumped Fiber Amplifier / S. W. Harun, M. R. A. Moghaddam, H. Ahmad // Laser Physics. - 2010. - № 10 (20). - C. 1899-1901. - DOI 10.1134/S1054660X10190072.

33. Horiguchi, M. Automatic Geometric Dimension Measurements of Single-Mode Fiber Preforms Using a Novel Shadow Method / M. Horiguchi, H. Itoh // Journal of Lightwave Technology. - 1989. - №7. - C. 1697-1704.

34. Imai, Y. Fluorescence-Based Temperature Sensing Using Erbium-Doped Optical Fibers with 1.48 μm Pumping / Y. Imai, T. Hokazono // Optical Review. - 1997. - № 1A (4). - C. 117-120. - DOI 10.1007/BF02936008.

35. Julsgaard, B. Er sensitization by a thin Si layer: Interaction-distance dependence / B. Julsgaard, Y.-W. Lu, R. V. Skougaard Jensen, T. G. Pedersen, K. Pedersen, J. Chevallier, P. Balling, 1A. Nylandsted Larsen // Physical Review. - 2011. - №84. - C. 1-7. - DOI 10.1103/PhysRevB.84.085403.

36. Karapanagiotis, C. Distributed fiber optic sensors for structural health

monitoring of composite pressure vessels / C. Karapanagiotis, M. Schukar, K. Krebber // *Technisches Messen*. - 2024. - №91. - C. 3-4. - DOI 10.1515/teme-2023-0170.

37. Kenyon, A. J. Erbium in silicon / A. J. Kenyon // *Semiconductor Science and Technology*. - 2005. - № 20. - C. R65-R84. - DOI 10.1088/0268-1242/20/12/R02.

38. Khawaja, E. E. XPS, Auger, Electrical and Optical Studies of Vanadium Phosphate Glasses Doped With Nickel Oxide / E. E. Khawaja, M. A. Salim, M. A. Khan, F. F. A1-Adel, G. D. Khattak, Z. Hussain // *Journal of Non-Crystalline Solids*. - 1989. - №110. - C. 33-43. - DOI 10.1016/0022-3093(89)90179-8.

39. Khopin, V. F. Doping of Optical Fiber Preforms via Porous Silica Layer Infiltration with Salt Solutions / V. F. Khopin, A. A. Umnikov, A. N. Gur'yanov, M. M. Bubnov, A. K. Senatorov, E. M. Dianov // *Inorganic Materials*. - 2005. - Vol. 41, No. 3. - C. 303–307. - DOI 10.1007/s10789-005-0128-7.

40. Konstantinov, Y. A. A Non-Destructive Study of Optical, Geometric and Luminescent Parameters of Active Optical Fibers Preforms / Y. A. Konstantinov, A. T. Turov, K. P. Latkin, Claude D., I. S. Azanova // *Optics*. - 2024. - №5(1). - C. 176-194. - DOI 10.3390/opt5010013.

41. Konstantinov, Yu. A. Special Optical Fiber Preform Layers 3D-Reconstruction / Yu. A. Konstantinov, K. P. Latkin, F. L. Barkov, A. S. Smirnov, M. M. Poskrebyshev, V. P. Pervadchuk, D. B. Vladimirova, Yu. A. Konin, A. I. Garanin, V. V. Burdin // *Scientific Visualization*. - 2017. - Vol. 9. №4. - C. 47-58. - DOI 10.26583/sv.9.4.05.

42. Krivosheev, A. I. State-of-the-Art Methods for Determining the Frequency Shift of Brillouin Scattering in Fiber-Optic Metrology and Sensing (Review) / A. I. Krivosheev, F. L. Barkov, Yu. A. Konstantinov, M. E. Belokrylov // *Instruments and Experimental Techniques*. - 2022. - №5. - C. 687-710. - DOI 10.1134/S0020441222050268.

43. Kurkov, A. S. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers / A. S. Kurkov // *Laser Physics Letters*. - 2007. - № 2 (4). - C. 93-102. - DOI 10.1002/lapl.200610094.
44. Kuroda, K. Determination of metastable state lifetimes of a high-concentration erbium-doped fiber under population inversion conditions at 980 nm pump and 1.5 μm probe wavelengths / K. Kuroda, Y. Yoshikuni // *Applied Physics B*. - 2020. - № 126. - DOI 10.1007/s00340-020-07484-7.
45. Kuroda, K. Metastable-state lifetime of erbium ions measured through delayed absorption in the fiber propagation direction / K. Kuroda, M. Nakandakari, Y. Yoshikuni // *Applied Physics*. - 2017. - №123. - C. 95.
46. Latkin, K. P. The Simulation of Active Ions Luminescence in the Preform Core under the Pumping Through the Lateral Surface / K. P. Latkin // *Optics Communications*. - 2023. - №542. - C. 129564. - DOI 10.1016/j.optcom.2023.129564.
47. Li, B. Denoising of Brillouin Gain Spectrum Images for Improved Dynamic Measurements of BOTDR / B. Li, N.-J. Jiang, X. Han // *IEEE Photonics Journal*. - №15(4). - C. 1-8. - DOI 10.1109/JPHOT.2023.3291465.
48. Lin, C. C. Calculation of Lifetime dependence of Er^{3+} on cavity length in dielectric half-wave and full-wave microcavities / C. C. Lin, D. G. Deppe // *Journal of Applied Physics*. - 1994. - №5. - C. 4668-4672. - DOI 10.1063/1.355919.
49. Lin, J. Broadband ASE source-enabled self-homodyne DA-RoF fronthaul using cascaded SOAs and a multicore fiber / J. Lin, C. Zhang, Y. Zhu, X. Liu // *Optics Letters*. - 2024. - №49(5). - C. 1353-1356. - DOI 10.1364/OL.515939.
50. Liu, W. S. Rare earth elements, aluminium and silicon distribution in the fern *Dicranopteris linearis* revealed by μPIXE Maia analysis / W.-S. Liu, J. S Laird, C.G Ryan, Y.-T. Tang, R.-L. Qiu, G. Echevarria, J.-L. Morel, A. van der Ent // *Annals of Botany*. - 2021. - №128(1). - C. 17-30. - DOI 10.1093/aob/mcab026.
51. Liu, X. A Fast Accurate Attention-Enhanced ResNet Model for Fiber-Optic

Distributed Acoustic Sensor (DAS) Signal Recognition in Complicated Urban Environments / X. Liu, H. Wu, Y. Wang, Y. Tu, Y. Sun, L. Liu, Y. Song, Y. Wu, G. Yan // *Photonics*. - 2022. - №9(10). - C. 677. - DOI 10.3390/photonics9100677.

52. Lupi, J.-F. Erbium- and Magnesium-codoped Silica-Based Transparent Glass Ceramic Core Fiber Made by FCVD and Flash Vaporization / J.-F. Lupi, M. Ude, S. Trzesien, B. Lenardič, H. Guillon, W. Blanc, B. Dussardier // *Photonics 2014: 12th International Conference on Fiber Optics and Photonics* (Optica Publishing Group, 2014). - paper T2B.6. - DOI 10.1364/PHOTON-ICS.2014.T2B.6.

53. Maity, S. Comparative Study of ASE-ASE and ASE-Laser Based Quantum Random Number Generators / S. Maity, A. Prosad, H. Natarajan, B. Velpula, V. Raghunathan // *IEEE Photonics Journal*. - 2024. - №99. - C.1-10. - DOI 10.1109/JPHOT.2024.3373644.

54. Marin, J. M. Energy Recycling From Distributed Fiber-Optic Sensors / J. M. Marin, I. Ashry, A. Trichili, O. Alkhazragi, C. H. Kang, T. K. Ng, B. S. Ooi // *IEEE Photonics Technology Letters*. - 2023. - №99. - C. 1. - DOI 10.1109/LPT.2023.3295405.

55. Markowski, K. Analysis of amplified spontaneous emission in ring-core Tm³⁺-doped optical fiber / K. Markowski, P. Miluski // *Photonics Letters of Poland*. - 2023. - №15(4). - 78-80. - DOI 10.4302/plp.v15i4.1252.

56. Martín-Ramosa, P. A new near-IR luminescent erbium(III) complex with potential application in OLED devices / P. Martín-Ramosa, M. D. Miranda, M. R. Silva, M. E. S. Eusebio, V. Lavín, J. Martín-Gile // *Polyhedron*. - 2013. - T. 65. - C. 187-192. - DOI 10.1016/j.poly.2013.08.035.

57. Mears, R. J. Low-noise Erbium-doped Fibre Amplifier Operating at 1.54 μm / R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, D. N. Payne // *Electronics Letters*. - 1987. - № 19 (23). - C. 1026-1028. - DOI 10.1049/EL:19870719.

58. Mello, P. A. Determination of rare earth elements in graphite by solid sampling electrothermal vaporization-inductively coupled plasma mass spectrometry /

P. A. Mello, M. F. Pedrotti, S. M. Cruz, E. I. Muller, V. L. Dresslera, E. M. M. Flores // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. - 2015. - №30(10). - C. 2048-2055. - DOI 10.1039/C5JA00136F.

59. Morrison, C. B. Low-Noise Erbium-Doped Fibre Amplifier Operating At 1.54 μm / C. B. Morrison, D. Botez, L. M. Zinkiewicz // *Electronics Letters*. - 1987. - Vol. 23, №19. - C. 1026-1028. - DOI 10.1049/EL:19870719.

60. Paschotta, R. Ytterbium-Doped Fibre Amplifiers / R. Paschotta, J. Nilsson, C. A. Tropper, D. C. Hanna // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. - 1997. - T. 33. - C. 1049-1056. - DOI 10.1109/3.594865.

61. Paul, M. C. Fabrication and performance of Er-doped phase-separated alumino-silicate based optical fiber for fiber amplifier / Mukul Chandra Paul, Anirban Dhar, Shyamal Das and Mrinmay Pal // *Advanced Photonics : [материалы международной конференции]* / Optica Publishing Group. - Barcelona, Spain, 2014. - DOI 10.1364/BGPP.2014.JTu3A.5.

62. Paul, M. C. A new class of erbium doped optical fiber for high power optical / M. C. Paul, M. Pal, S. Das, A. Dhar, S. K. Bhadra // *The Optical Society of India*. - 2016. - №45(3). - C. 260-268. - DOI 0.1007/s12596-016-0355-0.

63. Pauw, E. De Highly Sensitive Nondestructive Rare Earth Element Detection by Means of Wavelength-Dispersive X-ray Fluorescence Spectroscopy Enabled by an Energy Dispersive pn-Charge-Coupled-Device Detector / E. De Pauw, P. Tack, M. Lindner, A. Ashauer, J. Garrevoet, B. Vekemans, G. Falkenberg, F. E. Brenker, L. Vincze // *Analytical Chemistry* - 2020. - №92(1). - C. 1106-1113. - DOI 10.1021/acs.analchem.9b04176.

64. Peng, Q. Lasers in medicine / Q. Peng, A. Juzeniene, J. Chen, L. O. Svaasand, T. Warloe, K.-E. Giercksky, J. Moan // *Reports Progress in Physics* - 2008. - № 71. - C. 1-29. - DOI 10.1088/0034-4885/71/5/056701.

65. Peng, Y. Extending the Sensing Distance of a Single-end Random-access

BOTDA for Dynamic Sensing / Y. Peng, Z. Chen, W. Dong, Y. Dai, J. Lian, P. Xu, K. Wen, X. Dong, J. Yang, Y. Qin // *Journal of Lightwave Technology*. - 2024. - C. 1-9. - DOI 10.1109/JLT.2024.3381857.

66. Podberezskaya, N. V. Production of the Oxyfluorides of Holmium, Erbium and Ytterbium and Study of Their Crystal-Chemical Properties / N. V. Podberezskaya, L. R. Batsanova, L. S. Egorova // *Journal of Structural Chemistry*. - 1965. - № 6. - C. 815–818. - DOI 10.1007/BF00747101.

67. Presby, H. M. Preform core diameter measurement by fluorescence / H. M. Presby, D. Marcuse // *Applied Optics*. - 1981. - №20 (24). - C. 4324-4328. - DOI 10.1364/AO.20.004324.

68. Qian, L. Experiment on Erbium-Doped Fiber Amplifiers / L. Qian // [Advanced Labs for Special Topics in Photonics]. - 1998. - C. 1-36.

69. Qingrong, H. The Breakthrough of Specialty Fiber Fabricated by PCVD Based Process / H. Qingrong, T. Feng, Jie L., Marai R. // *Asia Optical Fiber Communication And Optoelectronic Exposition And Conference : материалы [международной] конф./ R&D Centre of Yangtze Optical Fiber and Cable Co.Ltd. - Wuhan, China, 2007. - C. 49-51. - DOI 10.1109/AOE.2007.4410699.*

70. Seongheum, H. MW peak power Er/Yb-doped fiber femtosecond laser amplifier at 1.5 μm center wavelength / Seongheum Han, Heesuk Jang, Seungman Kim, Young-Jin Kim, Seung-Woo Kim// *Lasers Physics*. - 2017. - №14. - C. 1-6. - DOI 10.1088/1612-202X/aa7c91.

71. Sidirolou, F. Investigation of erbium dopant distribution in silica optical fibers with fluorescence-based measurements using a near-field scanning microscope / Fotios Sidirolou, Ann Roberts, Greg W. Baxter // *Optical Engineering*. - 2014. - №53(12). - C. 1-6. - DOI 10.1117/1.OE.53.12.126104.

72. Sidirolou, F. Micro-characterisation of erbium-doped fibers using a Raman confocal microscope / F. Sidirolou, S. T. Huntington, A. Roberts, G. W. Baxter //

Optics Express. - 2005. - №13. - C. 5506-5512. - DOI 10.1364/OPEX.13.005506.

73. Smirnov, A. S. Rapid Method For Evaluating The Efficiency Of Excitation Energy Transfer Between Ytterbium And Erbium Ions In An Active Fiber Preform / A. S. Smirnov, K. P. Latkin, A. S. Kurkov, Y. E. Sadovnikova, E. G. Leksina // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. - 2015. - T. 51. №6. - C. 582-586. - DOI 10.3103/S8756699015060096.

74. Sojka, L. Neodymium-doped highly birefringent microstructure fiber laser / L. Sojka, L. Pajewski, P. Mergo, K. Jedrzejewski, L. Lewandowski, D. Furniss, A. B. Seddon, T. M. Benson, S. Sujecki, E. Beres-Pawlik // Laser Physics. - 2013. - № 23. - C. 085107. - DOI 10.1088/1054-660X/23/8/085107.

75. Stair, R. Infrared Absorption Spectra of Some Experimental Glasses Containing Rare Earth and Other Oxides / R. Stair, C. A. Faick // Journal of Research of the National Bureau of Standards. - 1947. - № 38. - C. 95-101. - DOI 10.6028/JRES.038.049.

76. Svinarenko, A. A. Theoretical Spectroscopy of Rare-Earth Elements: Spectra and Autoionization Resonances / A. A. Svinarenko, A. V. Glushkov, O. Yu. Khetselius, V. B. Ternovsky, Y. V. Dubrovskaya, A. A. Kuznetsova, V. V. Buyadzhi // Rare Earth Element. - 2017. - №4. - DOI 10.5772/intechopen.69314.

77. Tan, J. Characterize Fracture Development Through Strain Rate Measurements by Distributed Acoustic Sensor DAS / J. Tan, D. Zhu // International Hydraulic Fracturing Technology Conference: материалы конференции, январь 2022, Muscat – Muscat, 2022 – C. D011S004R001. - DOI 10.2118/205267-MS.

78. Tian, L. Rare earth metals detection and recognition based on laser induced breakdown spectroscopy and machine learning / L. Tian, L. Shen, D. Tian, Y. Ge, Z. Sun, Y. Liu // Optics Express. - 2023. - №31(12). - C. 20545-20558. - DOI 10.1364/OE.493905.

79. Tikhomirov, V. V. Er³⁺ doped ultra-transparent oxy-fluoride glass-ceramics

for application in the 1.54 μm telecommunication window / V. K. Tikhomirov, D. Furniss, A. B. Seddon, M. Ferrari, R. Rolli // *J. of Mater. Science Lett.* - 2002. - № 21. - C. 293-295. - DOI 10.1023/A:1017919719782.

80. Townsend, J. E. Solution-Doping Technique for Fabrication of Rare-Earth-Doped Optical Fibres / J. E. Townsend, S. B. Poole, D. N. Payne // *Electronics Letters*. - 1987. - Vol. 23, №7. - C. 329-331. - DOI 10.1049/el:19870244.

81. Vivona, M. Instrumentation for Simultaneous Non-Destructive Profiling of Refractive Index and Rare-Earth-Ion Distributions in Optical Fiber Preforms / M. Vivona, M. N. Zervas // *Instruments*. - 2018. - №2(4), C. 23. - DOI 10.3390/instruments2040023.

82. Waldenmaier, H. E. “Lab of the Future”—Today: Fully Automated System for High-Throughput Mass Spectrometry Analysis of Biotherapeutics / H. E. Waldenmaier, E. Gorre, M. L. Poltash, H. P. Gunawardena, X. A. Zhai, J. Li, B. Zhai, E. J. Beil, J. C. Terzo, R. Lawler, A. M. English, M. Bern, A. D. Mahan, E. Carlson, H. Nanda // *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*. - 2023. - №34(6). - C. 1073-1085. - DOI 10.1021/jasms.3c00036.

83. Wang, Q. Random coding method for SNR enhancement of BOTDR / Q. Wang, Q. Bai, C. Liang, Y. Wang, Y. Liu, B. Jin // *Optics Express*. - 2022. - №30(7). - C. 11604-11618. - DOI 10.1364/OE.456620.

84. Wosniok, A. Distributed fiber optic radiation sensors / A. Wosniok, K. Krebber // *Safety of Nuclear Waste Disposal*. - 2021. - №1. - C. 15-16. - DOI 10.5194/sand-1-15-2021.

85. Wysocki, P. F. Characteristics of Erbium-Doped Superfluorescent Fiber Sources for Interferometric Sensor Applications / P. F. Wysocki, M. J. Digonnet, B. Y. Kim, H. J. Shaw // *Journal of Lightwave Technology*. - 1994. - № 3 (12). - C. 550-567. - DOI 10.1117/1.OE.53.12.126104.

86. Yamauchi, Y. Applicability of the fiber optic DAS(Distributed Acoustic

Sensor) to the calculation of surface wave dispersion curves / Y. Yamauchi, J. Kasahara, Y. Hasada, H. Kawashima, Y. Sugimoto, Y. Takashi, K. Kubota // Japan Geoscience Union Annual Meeting : материалы конференции, 20-24 мая 2018, Chiba - Chiba, 2018.

87. Zhang, Y. V. Impact of automation on mass spectrometry / Y. V.Zhang, A. Rockwood // Clinica Chimica Acta. - 2015. - №450. - С. 298-303. - DOI 10.1016/j.cca.2015.08.027.

88. Абдршин, А. Н. влияние нагрева на люминесцентные свойства ионов эрбия в стекле / А. Н. Абдршин, В. А. Асеев, Р. К. Нурыев // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. - 2010. - № 3 (67). - С. 128.

89. Абрамов, А. Н. Изготовление волоконных световодов на основе фосфороалюмосиликатного стекла с высокой концентрацией Er_2O_3 / А. Н. Абрамов, М. М. Бубнов, Н. Н. Вечканов, А. Н. Гурьянов, К. В. Зотов, Д. С. Липатов, М. Е. Лихачев, М. В. Яшков // Неорганические материалы. - 2010. - том 46, №4. - С. 501-507.

90. Андреев, А. А. Особенности сверхъяркой фотолюминесценции ионов Er^{3+} в псевдоаморфных тонких пленках GaN / А. А. Андреев // Физика твёрдого тела. - 2002. - № 2 (44). - С. 239-245.

91. Асеев, В. А. Влияние концентрации активаторов на вероятность безызлучательного переноса энергии в высококонцентрированных иттербий-эрбиевых стеклах / В. А. Асеев, М. Н. Жукова, Е. М. Федорова // Асеев В.А., Жукова М.Н., Федорова Е.М. Влияние концентрации активаторов на вероятность безызлучательного переноса энергии в высококонцентрированных иттербий-эрбиевых стеклах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2006. - №26. - С. 123-128.

92. Белов, А. В. Волноводные свойства одномодовых волоконных

световодов / А. В. Белов, А. С. Курков // Ин-т общ. физики АН СССР, 1989. - №23. - С. 49-66.

93. Беляков, М. В. Метод автоматизированного люминесцентного контроля пригодности картофеля в пищевом производстве / М. В. Беляков // Пищевая технология. - 2023. - №4(393). - С. 108-112. - DOI 10.26297/0579-3009.2023.4.18.

94. Беспрозванных, В. Г. Модель кластеризации ионов эрбия в активном оптическом волокне / В. Г. Беспрозванных, Е. С. Селина, А. А. Поносова, Н. В. Сергеева // Мир науки и инноваций. - 2015. - №2 (2). - С. 28-32.

95. Беспрозванных, В. Г. Кооперативные ап-конверсионные переходы в активных волоконных световодах / В. Г. Беспрозванных, Е. С. Селина // Инновационная наука. - 2016. - №1. - С. 15-18.

96. Блинов, Л. М. Резонансные неравновесные СВЧ плазмохимические системы в технологии синтеза специальных кварцевых волоконных световодов / Л. М. Блинов, Ю. В. Гуляев, В. А. Черепенин, А. П. Герасименко // Журнал Радиоэлектроники. - 2014. - №12. - С. 26.

97. Буфетов, И. А. Волоконные Yb-, Er- Yb- и Nd-лазеры на световодах с многоэлементной первой оболочкой / И. А. Буфетов, М. М. Бубнов, М. А. Мелькумов, В. В. Дудин, А. В. Шубин, С. Л. Семенов, К. С. Кравцов, А. Н. Гурьянов, М. В. Яшков, Е. М. Дианов // Квантовая электроника. - 2005. - № 4 (35). - С. 328-334. - DOI 10.1070/QE2005v035n04ABEN002926.

98. Галуза, А. А. Широкодиапазонный многоугловой автоматизированный спектрофотометр-рефлектометр / А. А. Галуза, А. И. Галуза // Учёные записки таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: физика. - 2008. - №1, Т. 21 (60). - С. 19-26.

99. Губанов, К. О. Влияние мощности накачки на спектрально-люминесцентные характеристики высококонцентрированных иттербий-эрбиевых стекол / К. О. Губанов, В. А. Асеев, Н. В. Никоноров, А. К. Пржеvusкий, Ю. К.

Фёдоров // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. - 2006. - № 34. - С. 68-73.

100. Деулин, Б. И. Автоматизированный спектрофотометр с лазерным источником света / Б. И. Деулин // Приборостроение и биотехнические системы. - 2014. - №1 (303). - С. 122-127.

101. Деулин, Б. И. Автоматизированный однолучевой сканирующий лазерный спектрофотометр для контроля химического состава водоёмов / Б. И. Деулин // Охрана природы и региональное развитие: гармония и конфликты (к году экологии в России) : материалы международной конф./ Институт степи Уральского отделения Российской академии наук. - Оренбург, Россия, 2017. - С. 223-227.

102. Деулин, Б. И. Автоматизированный двухлучевой сканирующий спектрофотометр с источников света в виде модернизированного твердотельного лазера на красителях ЛКИ-301 / Б. И. Деулин // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2016. - №4 (68) том 2. - С. 82–91.

103. Деулин, Б. И. Автоматизированный двухлучевой сканирующий спектрофотометр с источников света в виде модернизированного твердотельного лазера на красителях ЛКИ-301 / Б. И. Деулин // Агротехника и энергообеспечение. - 2016. - №4 (13) том 2. - С. 61-71.

104. Дианов, Е. М. Волоконная оптика: сорок лет спустя / Е. М. Дианов // Квантовая электроника. - 2010. - № 1 (40). - С. 1-6. - DOI 10.1070/QE2010v040n01ABEH014260.

105. Дианов, Е. М. Легированные висмутом волоконные световоды — новый прорыв в лазерных средах для ближней ИК области спектра / Е. М. Дианов // Квантовая электроника - 2012. - №9(42). - С. 751-761. - DOI

10.1070/QE2012v042n09ABEN014970.

106. Дьяков, С. А. Особенности фотолюминесценции ионов эрбия в структурах с аморфными и кристаллическими нанокластерами кремния в матрице диоксида кремния / С. А. Дьяков, Д. М. Жигунов, В. Ю. Тимошенко // Физика и техника полупроводников. - 2010. - №44(4). - С. 486-490.

107. Ельяшевич, М. А. Спектры редких земель / М. А. Ельяшевич. — Москва : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953. - 462 с.

108. Жукова, М. Н. Измерение населенности метастабильного уровня стекол, активированных ионами эрбия / М. Н. Жукова, В. А. Асеев / Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2007. - №7. - С. 89-95.

109. Зайцева, С. В. Спектрально-люминесцентные свойства фторофосфатных стекол, активированных иттербием и эрбием / С. В. Зайцева, В. А. Асеев, Е. В. Колобкова, Н. В. Никоноров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2014. - №4(92). - С. 62-68.

110. Зинченко, Т. О. Автоматизированная система поворота дифракционной решетки спектрофотометра / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, К. Ю. Крайнова, П. Е. Голубков, Б. П. Сибринин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. - 2019. - №3 (29). - С. 119-126.

111. Козляков, А. С. Разработка автоматизированной системы управления спектрофотометром СФ-46 / А. С. Козляков, А. М. Метальников // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 18-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. / Ульяновский государственный технический университет. - Ульяновск, Россия, 2015. - С. 237-238.

112. Константинов, Ю. А. Автоматизированный сбор данных при

исследовании характеристик волоконных световодов на этапах производства / Ю. А. Константинов, И. И. Крюков, М. М. Поскребышев, Н. А. Харламова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2011. - №6-2 - С. 30-34.

113. Константинов, Ю. А. Автоматизация производства специальных волоконных световодов с применением эмуляторов физических процессов обратного рассеяния / Ю. А. Константинов, В. П. Первадчук // Автоматизация и современные технологии. - 2013. - №8. - С. 3-9.

114. Константинов, Ю. А. Телевизионная система измерения размеров заготовки волоконных световодов в ходе процесса химического парофазного осаждения / Ю. А. Константинов, Крюков И. И., Поскребышев М. М., Харламова Н. А. // Информатика, телекоммуникации и управления. - 2010. - №6 (113). - С. 155-159.

115. Курков, А. С. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности / А. С. Курков, Е. М. Дианов // Квантовая электроника. - 2004. - № 10 (34). - С. 881-900. - DOI 10.1070/QE2004v034n10ABEH002739.

116. Ларионов, А. И. Автоматизированные системы управления спектрофотометрическим оборудованием на примере СФ-46 / А.И. Ларионов, С.С. Алалыкин, А.С. Алалыкин, Е.А. Дурман // Вестник удмуртского университета. Физика и химия. - 2013. - Вып. 3. - С 3-6.

117. Латкин, К. П. Система управления процессом контроля концентрации активной примеси в преформах волоконных световодов / К. П. Латкин, В. П. Первадчук, Ю. А. Константинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. - 2022. - №42. - С. 111-131. - DOI 10.15593/2224-9397/2022.2.06.

118. Латкин, К. П. Оценка мощности люминесценции сердцевины заготовки волоконных световодов для измерения концентрации активных ионов / К. П.

Латкин, В. В. Бурдин, Ю. А. Константинов, В. П. Первадчук // Фотон-экспресс. - 2019. - №6 (158). - С. 170-171. - DOI 10.24411/2308-6920-2019-16085.

119. Латкин, К. П. Измерение однородности концентрации активной легирующей присадки вдоль длины активной оптической заготовки / К. П. Латкин, А. С. Смирнов, В. В. Бурдин, А. С. Курков // Фотон-экспресс. - 2015. - №6 (126). - С. 157-158.

120. Мелькумов, М. А. Распределение излучения накачки в лазерных волоконных световодах с многоэлементной первой оболочкой / М. А. Мелькумов, И. А. Буфетов, М. М. Бубнов, А. В. Шубин, С. Л. Семёнов, Е. М. Дианов // Квантовая электроника. - 2005. - № 11 (35). - С. 996-1002. - DOI 10.1070/QE2005v035n11ABEN013029.

121. Мелькумов, М. А. Влияние концентрации и методики введения ионов Yb^{3+} и Er^{3+} на эффективность передачи возбуждения в Er-Yb-фосфоросиликатных световодах / М. А. Мелькумов, А. Ю. Лаптев, М. В. Яшков, Н. Н. Вечканов, А. Н. Гурьянов, И. А. Буфетов // Неорганические материалы. — 2010. - № 3 (46). - С. 1-6.

122. Михайличенко, А. И. Редкоземельные металлы / А. И. Михайличенко, Е. Б. Михлин, Ю. Б. Патрикеев. - Москва: Металлургия, 1987. - 232 с.

123. Михайлов, В. А. Редкоземельные руды мира : Геология, ресурсы, экономика : монография / В. А. Михайлов. – Киев : Издательско-полиграфический центр "Киевский университет", 2010. - 223 с.

124. Пелконен, Я. Производство заготовок для вытяжки оптических волокон / Я. Пелконен // Фотоника - 2015. - № 4 (52). - С. 38-41.

125. Прохоров, А. М. Волоконная оптика: проблемы и перспективы / А. М. Прохоров, Е. М. Дианов // Наука в России. - 2001. - №1 - С. 52-54.

126. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022660503 Российская Федерация. erbiumCalc : № 2022660112 : заявл.

06.06.2022 : опубл. 17.06.2022 / К. П. Латкин.

127. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022666232 Российская Федерация. ErGO System : № 2022663356 : заявл. 07.07.2022 : опубл. 26.08.2022 / К. П. Латкин, Ф. Л. Барков, D. Claude.

128. Семёнов, Е. И. Минералогия редких земель / Е. И. Семёнов. - Москва : Издательство академии наук СССР, 1963. - 409 с.

129. Смирнов, А. С. Спектроскопический метод измерения однородности концентрации эрбия вдоль длины активной оптической заготовки / А. С. Смирнов, К. П. Латкин, В. В. Бурдин // Прикладная фотоника. - 2014. - №2. - С. 62-70. - DOI 10.15593/2411-4367/2014.2.04.

130. Сорокин, Ю. М. Оптические потери в световодах / Ю. М. Сорокин, В. С. Ширяев. - Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2000. - 324 с.

131. Ткачук, А. М. Исследование процессов межионного взаимодействия в новых лазерных кристаллах двойного фторида натрия-иттрия с редкоземельными ионами эрбия и иттербия / А. М. Ткачук, С. Э. Иванова, Ю. А. Сарычев // Фотоника и оптоинформатика. - [2007]. - [№ 4]. - С. 109-126.

132. Череповицын, А. Е. Анализ производства и потребления редкоземельных металлов в странах ЕС и БРИКС / А. Е. Череповицын, С. В. Федосеев, А. Б. Тесля, Е. Ю. Выболдина // Цветные металлы. - 2015. - №5(869). - С. 5-10. - DOI 10.17580/tsm.2015.05.01.

Приложение 1. Листинг ключевых фрагментов разработанных программ для ЭВМ

Листинг ключевых фрагментов программы для ЭВМ erbiumCalc (MainForm.cs)

```
//Введение данных
double
power = Convert.ToDouble(textBoxPower.Text),
dPump = Convert.ToDouble(textBoxDPump.Text) / 1000,
dDetector = Convert.ToDouble(textBoxDDetector.Text) / 1000,
wideningAngle = Convert.ToDouble(textBoxWideningAngle.Text),
dPreform = Convert.ToDouble(textBoxDPreform.Text) / 1000,
dCore = Convert.ToDouble(textBoxDCore.Text) / 1000,
lPump = Convert.ToDouble(textBoxLPump.Text) / 1000,
lDetector = Convert.ToDouble(textBoxLDetector.Text) / 1000,
sigma = Convert.ToDouble(textBoxSigma.Text),
concentration = Convert.ToDouble(textBoxConcentration.Text),
n1 = Convert.ToDouble(textBoxN1.Text),
n2 = Convert.ToDouble(textBoxN2.Text);

double
lambda12 = 980e-9,
lambda31 = 1550e-9,
time31 = 0.012,
c = 3e8,
h = 6.63e-34;

//Информация
printTitle("Входные данные измерений");
printValue("Мощность накачки", power, "Вт");
```

```

printValue("Диаметр коллиматора накачки", dPump, "м");
printValue("Диаметр коллиматора фотоприёмника", dDetector, "м");
printValue("Угол уширения пучка накачки (апертура)", wideningAngle,
"рад");
printValue("Диаметр заготовки", dPreform, "м");
printValue("Диаметр сердцевины", dCore, "м");
printValue("Расстояние от заготовки до накачки", lPump, "м");
printValue("Расстояние от заготовки до фотоприёмника", lDetector,
"м");
printValue("Сечение поглощения ионов эрбия", sigma, "м^2");
printValue("Концентрация ионов эрбия", concentration, "1/м^3");
printValue("Показатель преломления среды", n1, "");
printValue("Показатель преломления заготовки", n2, "");
printInfo("Постоянные параметры:");
printValue("Длина волны накачки", lambda12, "м");
printValue("Длина волны люминесценции", lambda31, "м");
printValue("Среднее время перехода с метастабильного уровня на
стабильный", time31, "с");

//Расчет прохождения
printTitle("Расчёт поглощения");
double
taoCore = Math.Exp(-sigma * concentration * dCore),
taoFresnel = 1 - Math.Pow((n2 - n1) / (n2 + n1), 2);
printValue("Самые большие возможные потери мощности накачки на
сердцевине (поглощение)", (1 - taoCore) * 100, "%");
printValue("Потери мощности накачки на переходе из одной среды в
другую (отражение Френеля)", (1 - taoFresnel) * 100, "%");
if (taoCore >= 0.90)
{
    printInfo("Потери от поглощения на сердцевине незначительны.
Интенсивность накачки можно считать постоянной по всей сердцевине.");
}
else
{

```

```

    printInfo("ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ: Потери от поглощения на сердцевине
достаточно большие и расчёты модели не могут считаться корректными.");
}

```

```
//Расчёт углов
```

```

printTitle("Расчёт геометрии пучка света у сердцевины");
double
phi = 2 * lambda12 / (Math.PI * dPump);
printValue("Угол дифракционной расходимости (полуугол конуса
расхождения пучка)", phi, "рад");
if (phi < wideningAngle / 10)
{
    printInfo("Расчётный угол уширение пучка намного меньше
реального.");
}
else
{
    printInfo("Расчётный угол близок по порядку к реальному");
}

```

```
//Расчёт размеров пучка у сердцевины
```

```

double
y1 = dPump / 2 + lPump * Math.Tan(wideningAngle),
teta2Y = Math.Asin(n1 / n2 * Math.Sin(wideningAngle + Math.Asin(2 * y1
/ dPreform))) - Math.Asin(2 * y1 / dPreform),
dCoreY = dPump + 2 * lPump * Math.Tan(wideningAngle) + 2 * dPreform /
2 * Math.Tan(teta2Y),
teta2X = Math.Asin(n1 / n2 * Math.Sin(wideningAngle)),
dCoreX = dPump + 2 * lPump * Math.Tan(wideningAngle) + 2 * dPreform /
2 * Math.Tan(teta2X),
iCore = (4 * power * taoFresnel) / (Math.PI * dCoreY * dCoreX);
printValue("Высота эллипса по вертикали (Y)", dCoreY, "м");
printValue("Ширина эллипса по горизонтали (X)", dCoreX, "м");
printValue("Интегральная интенсивность накачки в пучке", iCore,
"Вт/м^2");

```

```

if (dCore < dCoreY)
{
    printInfo("Пучок освещает всю сердцевину. Измерения интегральной
концентрации будут точны.");
}
else
{
    printInfo("ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ: Пучок освещает не всю сердцевину.
Вероятно, измерение интегральной концентрации в сердцевине будет
неточным.");
}

//Расчёт параметров стационарного режима.
printTitle("Расчёт параметров стационарного режима");
double
alpha = sigma * time31 * iCore / (h * c / lambda12),
beta = alpha / (1 + alpha),
tRegime = (time31 * (h * c) / (sigma * iCore * lambda12)) / (time31 +
(h * c) / (sigma * iCore * lambda12)),
omega = dDetector * dDetector / (16 * (dPreform / 2 + lDetector) *
(dPreform / 2 + lDetector)),
coefLum = h * c * Math.PI * (dCore / 2) * (dCore / 2) * dCoreX /
(time31 * lambda31) * beta * omega,
pLum = concentration * coefLum;
printValue("Коэффициент альфа", alpha, "о.е.");
printValue("Коэффициент бета", beta, "о.е.");
printValue("Время установления режима", tRegime, "с");
printValue("Коэффициент перевода из концентрации в мощность", coefLum,
"Вт*м^3");
printValue("Мощность для указанной концентрации", pLum, "Вт");

//Расчёт мощности насыщения
printTitle("Расчёт точки насыщения");
double[] powers = new double[81];
double[] betas = new double[81];

```

```

for (int i = 0; i < 81; i++)
{
    powers[i] = i * 5;
    double
    tempICore = (4 * powers[i] * taoFresnel) / (Math.PI * dCoreY *
dCoreX),
    tempAlpha = sigma * time31 * tempICore / (h * c / lambda12);
    betas[i] = tempAlpha / (1 + tempAlpha);
}
for (int i = 0; i < 81; i++)
{
    printValue("Мощность излучения", powers[i], "Вт");
    printValue("Коэффициент бета для этой мощности", betas[i], "o.e.");
}
double tempK = (betas[1]-betas[0]) / (powers[1] - powers[0]);
for (int i = 1; i < 81; i++)
{
    if (Math.Abs(tempK*powers[i]-betas[i])/(tempK * powers[i]) > 0.10)
    {
        printValue("Тока начала режима насыщения", powers[i], "Вт");
        if (powers[i] / power > 10)
        {
            printInfo("Мощность накачки намного меньше
мощности насыщения.");
        }
        else
        {
            printInfo("ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ: Мощность накачки близка
по порядку к мощности насыщения. Расчёты некорректны.");
        }
        break;
    }
}
}

```

Листинг ключевых фрагментов программы для ЭВМ ErGO System (Device.cs)

```

/// <summary>
/// Расчётная концентрация ионов эрбия в сердцевине.
/// Происходит непосредственно сама компенсация по эталону.
/// </summary>
/// <param name="averageOfMeasurements">Усреднение по
измерениям.</param>
/// <param name="DiameterOfPreform">Диаметр преформы в
миллиметрах.</param>
/// <returns></returns>
public static double GetConcentration(int averageOfMeasurements,
double DiameterOfPreform)
{
    // Если концентрация по умолчанию, то 0
    // Если напряжения на эталоне некорректны, то 0
    if (ConcentrationOfReference < 0 || Voltage1OfReference <= 0 ||
Voltage2OfReference <= 0)
        return 0;
    //Делаем замер
    GetVoltage(averageOfMeasurements);

    // На всякий случай не дадим диаметру выйти за пределы допустимых
значений.
    DiameterOfPreform = (DiameterOfPreform <= 8 ) ? 8 :
DiameterOfPreform;
    DiameterOfPreform = (DiameterOfReference >= 20) ? 20 :
DiameterOfPreform;

    // Корректируем по френелевскому отражению напряжение 2
    double voltage2OfReferenceCorrected = Voltage2OfReference /
CorrectionQuantityOfReflection(DiameterOfReference);
    double voltage2OfPreformCorrected = Voltage2 /

```



```

CorrectionQuantityOfReflection(DiameterOfPreform);

// Нормируем напряжение 1 по напряжению 2
double voltage1ofReferenceNormalized = Voltage1ofReference /
voltage2ofReferenceCorrected;
double voltage1ofPreformNormalized = Voltage1 /
voltage2ofPreformCorrected;

// Находим концентрацию
return ConcentrationOfReference * voltage1ofPreformNormalized /
voltage1ofReferenceNormalized;
}

/// <summary>
/// Нахождение поправочного коэффициента по эмпирической формула,
учитывающего обратно отражённый в рэлеевский разветвитель свет.
/// Например, если функция возвращает 1.23, то можно рассчитать чистую
мощность накачки:
/// Voltage2 / 1.23.
/// </summary>
/// <param name="preformDiameter">Диаметр преформы в миллиметрах (10-
20 мм). </param>
/// <returns></returns>
public static double CorrectionQuantityOfReflection(double
preformDiameter)
{
    double a = -0.00144;
    double b = 0.05442;
    double c = 0.68584;
    return preformDiameter * preformDiameter * a + preformDiameter * b +
c;
}

```

Приложение 2. Структура генерируемых программой ErGO System файлов

Пример содержания файла измерений

9/2/2022	5:31 PM			
Name of preform:	Test			
Diameter of preform (mm):	8			
Minimal position of rail (mm):	200			
Maximal position of rail (mm):	300			
Stepsize (mm):	100			
Average (measurements):	30			
Average (tune):	5			
Mode:	express			
Z (rail, mm)	Y (detector, mm)	X (diode, mm)	U1 (mV)	U2 (mV)
200	9.38	21.02	2006.59	349.05
300	9.54	20.88	2082.31	358.81
Z (rail, mm)	C (ppm)			
200	3065.295			
300	3094.440			
Contact switch is reached				

Пример содержания файла калибровки

t (s)	U1 (mV)	U2 (mV)	T (°C)
0.99	232.13	381.38	20.89
2	233.25	382.69	22.26
3.02	232.31	378.38	22.26
4.13	233.63	381.19	22.26
5.15	234.56	376.5	22.26
6.19	229.69	379.88	22.32
7.2	227.25	378.19	22.26
8.22	232.31	380.44	22.32
9.24	231	379.13	22.32
10.26	230.44	378.56	22.32
11.3	227.81	380.81	22.32

Приложение 3. Акты во внедрении результатов диссертационной работы

Акт ведрения в производственный процесс

Акционерное общество «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»



Публичное акционерное общество
«Пермская научно-производственная
приборостроительная компания»
(ПАО «ПНППК»)



Россия, 614007, г. Пермь, ул. 25 Октября, 106
тел.: +7 (342) 240 05 12, факс: +7 (342) 280 97 19, e-mail: info@pnppk.ru
ИНН 5904000395, КПП 590401001

АКТ № 66/0-69-а от 11.06.2024

о внедрении результатов диссертационной работы

Латкина Константина Павловича,

представленной на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Настоящий акт свидетельствует о том, что научно-технические результаты диссертационной работы Латкина Константина Павловича, посвящённой автоматизации неразрушающего контроля параметров заготовок активных волоконных световодов, внедрены в производство активных волоконных световодов ПАО «Пермской научно-производственной приборостроительной компании».

К использованию в ПАО «ПНППК» принята разработанная автором автоматизированная система контроля параметров распределения концентрации активной примеси в заготовках активных волоконных световодов.

В автоматизированной системе контроля использована модель и основанный на указанной модели метод управления технологическим процессом изготовления активных волоконных световодов.

Применение внедрённых разработок позволило оперативно отслеживать качество заготовок активных волоконных световодов и удешевить производство на стадии отработки технологии на 29%, в ходе серийного изготовления продукции — на 6%.

Создание системы осуществлялось Латкиным К. П. В составе научной группы Лаборатории фотоники ПФИЦ УрО РАН по договору с ПАО «ПНППК» № 01/0418 от 25.04.2018 г.

Заместитель генерального директора
по науке - директор НТЦ – главный конструктор



Субботин А. В.



Шевцов Денис Игоревич
НТЦ ПАО ПНППК, 89617579647, shevtsov@pnppk.ru

pnppk.ru

Акт внедрения в научно-исследовательский процесс



Протокол еженедельного научного семинара
 Лаборатории фотоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки
 Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук
 (ПФИЦ УрО РАН) от «06» 09 2023 г., прошедшего в 15:00 по адресу
 614990, г. Пермь, ул. Ленина, 13А, ауд. 105

Комиссия в составе: Константинов Ю.А., Барков Ф.Л., Кривошеев А.И., прослушав выступление соискателя, м.н.с. Лаборатории фотоники ПФИЦ УрО РАН Латкина К.П., составила:

АКТ

внедрения (использования) результатов диссертационной работы
 Латкина Константина Павловича,
 представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук

Настоящий акт свидетельствует о том, что разработанная в диссертации Латкина Константина Павловича автоматизированная система научных исследований внедрена с исследовательский процесс Лаборатории фотоники Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук.

1. Разработка позволила впервые осуществлять томографические измерения концентрации активных ионов в заготовках волоконных световодов.
2. Получаемая визуализация структуры осаждённого слоя используется для оценки и определения параметров физико-химических процессов осаждения реагентов внутри опорной трубы.
3. Автоматизированная система, представленная Латкиным К.П., позволила вдвое повысить точность определения концентрации РЗМ в преформах и минимум на порядок повысить пространственное разрешение в сравнении с использовавшимся до этого методом.
4. Также автоматизированная система, описанная в диссертации, позволила полностью упразднить рутинные операции исследователя при исследовании РЗМ в преформах, до этого занимавшие от 1 до 3 часов.

Результаты научных исследований, полученные соискателем в рамках подготовки диссертационной работы, входили в отчётные материалы по Государственному заданию Лаборатории фотоники ПФИЦ УрО РАН по теме № АААА-А19-119042590085-2 «Разработка и создание основ проектирования, диагностики и моделирования оптоэлектронных устройств и их элементов».

Члены комиссии:

Зав. лаб., с.н.с., к.т.н.

Константинов Ю.А.

с.н.с., к.ф.-м.н.

Барков Ф.Л.

м.н.с., к.т.н.

Кривошеев А.И.

Подписи Константинова Ю. А., Баркова Ф. Л.,
 Кривошеева А.И.

ЗАВЕРЯЮ:

Главный ученый секретарь
 ПФИЦ УрО РАН, к.ф.-м.н.

Вотинова А.Г.

Исп.: Константинов Ю.А.



Акт внедрения в образовательный процесс

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»
(ПНИПУ)**

614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29.

Тел.: 8(342) 219-80-67. Факс: 8(342) 212-39-27

E-mail: rector@pstu.ru; <http://www.pstu.ru>

ОКПО 02069065 ОГРН 1025900513924 ИНН/КПП 5902291029/590201001

№ _____
На № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Латкина Константина Павловича, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук

Настоящий акт свидетельствует о том, что основные результаты диссертационной работы Латкина Константина Павловича, посвящённой автоматизации неразрушающего контроля параметров заготовок активных волоконных световодов, используются в образовательном процессе, реализуемом для студентов направления подготовки 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика».

Предложенная в работе автоматизированная система контроля нашла применение в образовательном процессе на кафедре общей физики ПНИПУ в рамках следующих дисциплин: «Волноводная фотоника» (IV год обучения бакалавриата), «Оптическое материаловедение» (III год обучения бакалавриата) и «Производственная практика» (III год обучения бакалавриата).

Эффект от внедрения результатов заключается в повышении уровня освоения профессиональных компетенций по способности применять естественнонаучные и общинженерные знания в инженерной деятельности, связанной с технологиями производства элементов, приборов и систем фотоники и оптоинформатики, что соответствует требованиям ФГОС по специальности.

Итоги внедрения результатов диссертационной работы обсуждались на заседании кафедры общей физики ПНИПУ «21» мая 2024 г. (Протокол №21).

Заведующий кафедрой
общей физики ПНИПУ _____

Перминов А. В.

Исполняющий обязанности
ректора ПНИПУ _____

Петроченков А. Б.



Сертифицировано
«РУССКИМ РЕГИСТРОМ»