

На правах рукописи

Латкин Константин Павлович

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

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Пермь, 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Первадчук Владимир Павлович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Бурдин Антон Владимирович**
доктор технических наук, доцент, АО «НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова», советник генерального директора по инновациям

Левченко Андрей Евгеньевич
кандидат физико-математических наук, Научный центр волоконной оптики им. Е. М. Дианова РАН — обособленное подразделение ФГБУ Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН», лаборатория спектроскопии, старший научный сотрудник

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный университет», Ульяновск

Защита состоится «20» декабря 2024 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.14 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru>).

Автореферат разослан «25» октября 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

В. И. Фрейман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 принесённые 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. Lupi. Контроль концентрации ионов эрбия в кварцевом стекле неразрушающим люминесцентным методом рассматривается в работах В. Julsgaard, F. Sidirolou 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 А. Chopard рефлектотрии — 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 М. Horiguchi, S. K. Bhadra и В. L. Vachim.

В близких по теме работах автоматизация измерений концентрации активной примеси стёкол раскрыта недостаточно, а в близких по теме работах не уделяется достаточно внимания точному позиционированию образцов.

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.

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.

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% .

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 сердцевины 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» (г. Пермь, 2020), Международная конференция «Graphicop-2017» (г. Пермь, 2017), Международная конференция «Оптические технологии в коммуникациях» (г. Самара, 2016), «Всероссийская конференция по волоконной оптике» (г. Пермь, 2015), Всероссийский «6-й семинар по волоконным лазерам» (г. Новосибирск, 2014), Всероссийская конференция «Мир фотоники» (г. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическая и теоретическая значимости, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён обзор факторов, влияющих на производство активных волоконных световодов, в частности, высокая стоимость химических соединений лантаноидов, человеческий фактор, сложно выполнимый полный контроль физических процессов, происходящих в процессе модифицированного химического парофазного осаждения. Обозначена необходимость промежуточного контроля заготовок на предмет однородности распределения активных ионов вдоль длины.

В научной литературе описано множество методик, например, рентгеноскопических и химических, которые способны с высокой точностью измерить концентрации требуемых элементов. Однако этому сопутствует разрушение на измеряемых объектах исследуемых участков, факт чего является несовместимым с

непрерывным производством.

Другие перспективные методики используют измерение люминесценции (F. Sidirilgou, M. Vivona, B. Julsgaard). Ключевой особенностью таких технологий является наличие накачки, соответствующей линии поглощения исследуемого иона. В большинстве случаев такие методики направлены на измерение химического состава волоконных световодов. Другой проблемой зачастую является исключительно научная направленность исследований с отсутствием автоматизации процесса. Стоит отметить, что методики, реализующие метод люминесцентной фотометрии, зачастую не имеют системы точного механического позиционирования оптических элементов или требуют использования иммерсионной жидкости.

Во второй главе приведена математическая модель люминесценции сердцевинки заготовки активного волоконного световода в условиях боковой накачки посредством лазерного диода. В качестве легирующего элемента были взяты ионы эрбия как наиболее часто используемые.

Цель моделирования — оценить параметры люминесценции сердцевинки заготовки активного волоконного световода в условиях боковой засветки излучением накачки (см. рисунок 1).

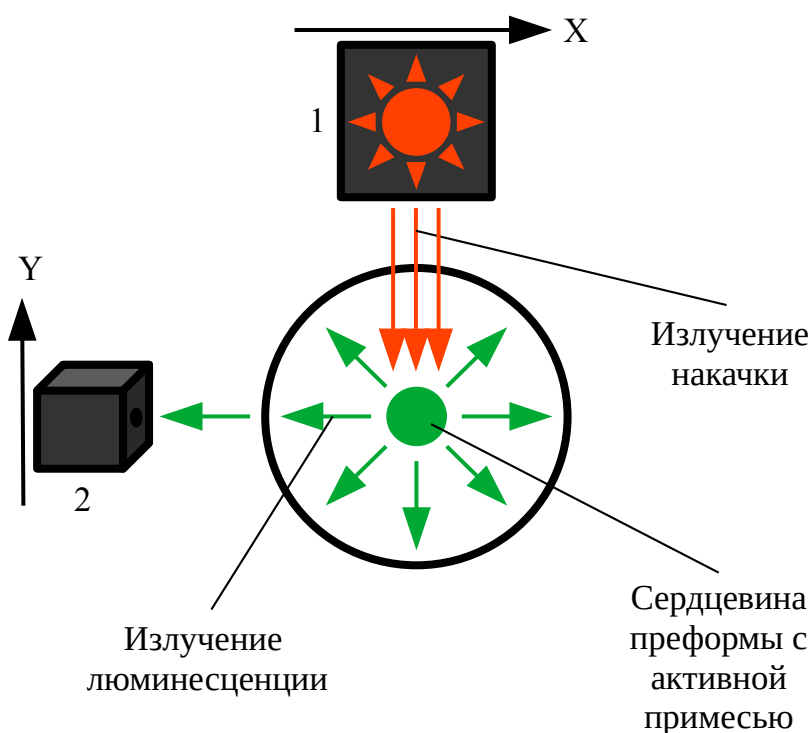


Рисунок 1 — Боковая засветка сердцевинки заготовки в поперечном разрезе. 1 — диод накачки, установленный напротив сердцевинки по оси X , 2 — фотоприёмник измерительного канала, установленный напротив сердцевинки по оси Y

Первым объектом-оригиналом является заготовка активного волоконного световода, цилиндрическая структура из кварцевого стекла с диаметром порядка 1 см, имеющая незначительное повышение показателя преломления к геометрической оси. В модели допускается, что строго цилиндрическая заготовка имеет однородный показатель преломления в поперечном сечении заготовки и сердцевину диаметром порядка 1 мм, в которой равномерно распределены ионы

эрбия.

Система засветки как второй объект-оригинал имеет диод. Последний создаёт пространственно гауссов пучок монохроматического излучения ($\lambda=980\text{ нм}$), ограниченный диаметром коллиматора.

Оценки и вычисления проводились с использованием законов волновой и лучевой оптики (закон Ламберта-Бугера-Бера, законы Снелиуса, формулы Френеля, дифракционная оптика), а также квантовой оптики (кинетические уравнения энергетических переходов).

Система накачки представляет собой лазерный диод, освещающий с боковой стороны заготовку. В свою очередь, фотоприёмник фиксирует люминесценцию оптически активной сердцевинки.

Прежде, чем описывать процесс накачки с точки зрения квантовой оптики, были проведены первичные расчёты с целью отсеять малозначительные факторы, которые, вероятно, могли бы повлиять на результаты замеров люминесценции сердцевинки.

Для оценки доли поглощённой мощности накачки были взяты входные параметры заготовок, которые в значительной степени могли бы повлиять на измерения при имеющемся производстве. Максимальное сечение поглощения в спектральном диапазоне, лежащем в окрестности длины волны $\lambda=980\text{ нм}$, имеет значение $\sigma=3.3\cdot 10^{-25}\text{ м}^2$. Достаточно большие концентрации ионов эрбия в кварцевом стекле соответствуют значению $n=10^{26}\text{ м}^{-3}$. Максимально возможной оптической длиной хода был взят диаметр сердцевинки $d=0.0015\text{ м}$. С помощью закона Ламберта-Бугера-Бера рассчитана доля прошедшей мощности излучения накачки:

$$P=P_0\cdot\exp(-3.3\cdot 10^{-25}\text{ м}^2\cdot 10^{26}\text{ м}^{-3}\cdot 0.0015\text{ м})=P_0\cdot 0.95. \quad (1)$$

Это значит, что лишь 5% мощности излучения накачки поглощается сердцевинкой. Это говорит об отсутствии эффекта насыщения, а значит и нелинейных процессов, в том числе вынужденного излучения. Последнее также невозможно из-за отсутствия выраженного оптического резонатора.

Френелевское отражение за счёт своей избирательности создаёт незначительную степень поляризации у освещающих сердцевинку лучей до 1.5% даже при стандартном диаметре производственной заготовки $D=12\text{ мм}$.

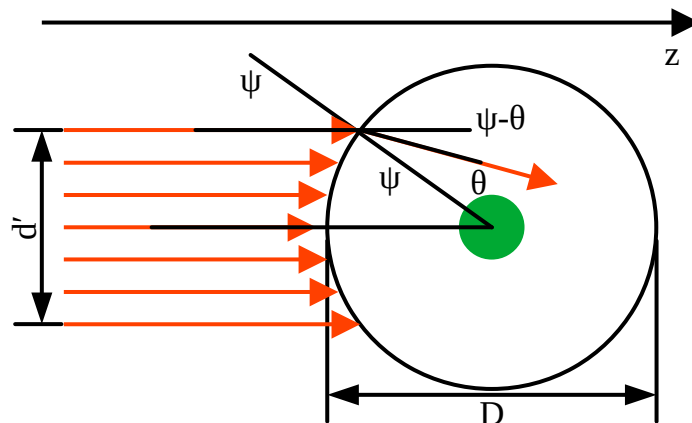


Рисунок 2 — Коллимация светового пучка накачки цилиндрической поверхностью.

Ось z сонаправлена лучам. ψ — угол падения крайнего верхнего луча,

θ — угол преломления крайнего верхнего луча

Освещённость такой сердцевинки можно определить с помощью законов Снелиуса (см. рисунок 2). Даже при малых диаметрах коллиматора $d'=3\text{ мм}$ наибольший и наименьший диаметры проходящего через сердцевинку пучка имеют значения 0.002 м и 0.003 м , соответственно. Это значит, что можно говорить о полной освещённости сердцевинки и фиксации суммарной концентрации ионов в данной области (см. рисунок 3).

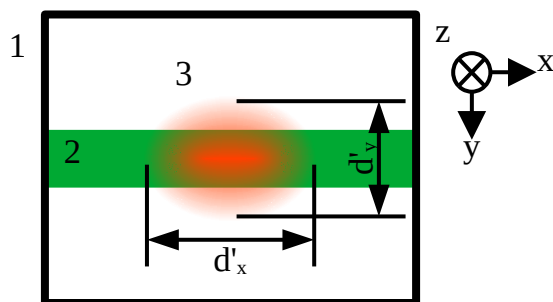


Рисунок 3 — Вид на боковую поверхность по направлению распространения пучка. 1 — заготовка, 2 — сердцевина, легированная ионами эрбия, 3 — эллиптический пучок накачки, прошедший через боковую поверхность заготовки

Оценки дифракционного расхождения пучка показали, что это явление стоит учитывать лишь при пройденных светом расстояниях порядка 1 м (угол расхождения порядка 0.01 рад).

Ввиду незначительного влияния описанных явлений ключевой частью модели является оценка динамики процесса накачки. Его можно описать кинетическими уравнениями электронных переходов (см. рисунок 4). Главным предметом здесь является населённость метастабильного уровня 3 (n_3), так как эта величина прямо пропорциональна мощности люминесценции

$$I_{luminescence} \sim n_3 . \quad (2)$$

Вместе с населённостью основного уровня (n_1) они определяют общую концентрацию ионов эрбия:

$$n_0 = n_1 + n_3 . \quad (3)$$

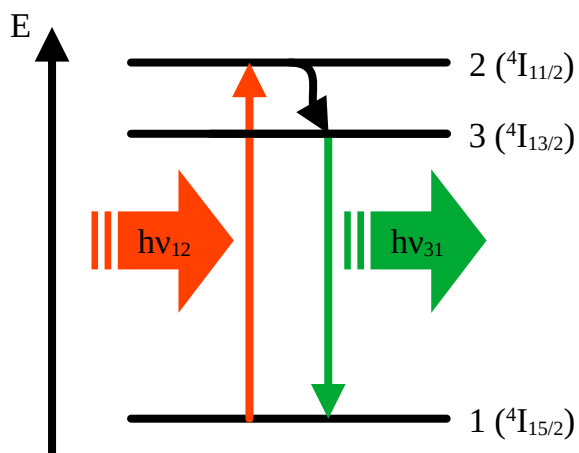


Рисунок 4 — Трёхуровневая квантовая система иона эрбия. 1 уровень — основной, 2 уровень — возбуждённый нестабильный, 3 уровень — возбуждённый метастабильный

Населённость второго уровня n_2 не учитывается ввиду его быстрого расселения в процессе безызлучательного перехода.

Тогда динамика заселения и расселения 1 и 3 уровней описывается следующими уравнениями:

$$\frac{dn_1}{dt} = -b_{12} I_{pump}(t) n_1, \quad \frac{dn_3}{dt} = -\frac{dn_1}{dt} - a_{31} n_3, \quad (4)$$

где $I_{pump}(t)$ — динамически меняющаяся интенсивность излучения накачки,

$$b_{12} = \frac{\sigma_{12}}{h\nu_{12}} = 1.626 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}^3}{\text{Дж}} \quad \text{— вероятностный коэффициент вынужденного}$$

поглощения фотона накачки, $a_{31} = \frac{1}{\tau_{31}} = 83.33 \frac{1}{\text{с}}$ — вероятностный коэффициент спонтанного излучения фотона люминесценции. Стоит упомянуть, что здесь не учитываются коэффициенты, связанные с вынужденным излучением ввиду его отсутствия.

Результирующее уравнение, нормированное по n_0 , имеет вид:

$$\frac{d\tilde{n}_3}{dt} = b_{12} I_{pump}(t) \tilde{n}_1 - a_{31} \tilde{n}_3, \quad (5)$$

где $\tilde{n}_3 = \frac{n_3}{n_0}$ — доля ионов в возбуждённом состоянии. То же самое с учётом

$$\tilde{n}_1 = 1 - \tilde{n}_3 :$$

$$\frac{d\tilde{n}_3}{dt} = b_{12} I_{pump}(t) - (a_{31} + b_{12} I_{pump}(t)) \tilde{n}_3. \quad (6)$$

Моделирование показывает, что даже значительные изменения мощности излучения накачки от нулевого значения до максимального сопровождаются временем установления режима порядка $\tau_{31} = 12 \text{ мс}$, а наличие достаточно высокой интенсивности излучения в области сердцевины порядка $I_{pump}(t) = 400 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$

приводит к незначительной доле возбуждённых ионов меньше 1%. Это указывает на то, что измерения люминесценции длительностью порядка секунды не зафиксируют искажений, вносимых динамикой изменения населённостей уровней, а насыщение, подобное инверсии населённостей в лазерах, не может быть достигнуто в таких условиях. Такой вывод также не противоречит предыдущим оценкам.

Верификация уравнения (6) была эмпирически осуществлена посредством экспериментальной оценки времени жизни. В эксперименте оптическая волоконная схема, содержащая активный волоконный световод, накачивалась прямоугольными импульсами. В дальнейшем динамика релаксации спонтанной люминесценции эрбиевого световода фиксировалась фотоприёмником с высокой частотой. Далее были определены диапазоны времени жизни в возбуждённом состоянии. Рассматриваемая величина варьировалась для разных длин волокон и имела порядок 10 мс. При малых длинах время жизни увеличивалось, что согласуется с источниками при условии, что спонтанное излучение формируется в кварцевом световоде.

Предположив, что режим накачки-люминесценции станет стационарным

$$\frac{d\tilde{n}_3}{dt} = 0, \quad \text{можно получить формулу:}$$

$$\tilde{n}_3 = \frac{b_{12} I_{pump}}{a_{31} + b_{12} I_{pump}} . \quad (7)$$

Адекватность модели можно проверить условием достаточно высокой интенсивности накачки, которой должен соответствовать эффект насыщения среды:

$$\lim_{I_{pump} \rightarrow +\infty} \frac{b_{12} I_{pump}}{a_{31} + b_{12} I_{pump}} = 1 . \quad (8)$$

Однако, согласно численным значениям, коэффициент спонтанного излучения на порядки больше второго слагаемого $a_{31} \gg b_{12} I_{pump}$. Таким образом, выявляется следующая зависимость:

$$\tilde{n}_3 = \frac{b_{12} I_{pump}}{a_{31}} . \quad (9)$$

Если считать, что в процессе спуска время порядка $\tau_{31} = 12 \text{ мс}$ установился стационарный режим, то за единичный промежуток времени одно и то же количество возбуждённых ионов в среде будет спонтанно переходить в основное состояние. Так как данное явление сопровождается равными вероятностями излучения фотонов для всех направлений распространения, то фотоприёмник, установленный в определённой области этой системы, охватывая незначительную часть пространственного угла, будет фиксировать стабильное значение. Так как оптомеханическая система в данном случае стационарна, то будем считать стабильным коэффициент передачи люминесценции фотоприёмнику. Тогда мощность люминесценции пропорциональна концентрации активных ионов n_3 , и выявляется следующая зависимость:

$$I_{luminescence} \sim \tilde{n}_3 \quad \text{или} \quad I_{luminescence} \sim n_0 I_{pump} . \quad (10)$$

Правая часть зависимости напрямую связана не только с концентрацией ионов, но и с измеряемой мощностью накачки. Такое эталонное измерение происходит ещё в области переноса света от диода накачки до поверхности заготовки.

Важно, что поверхность заготовки ввиду френелевского отражения и рэлеевского рассеяния также создаёт незначительную засветку в фотоприёмнике-эталоне. По этой причине с помощью пассивных заготовок разного диаметра была получена эмпирическая зависимость, показывающая насколько интенсивность увеличивается посредством этих явлений. Её функциональное выражение было получено наиболее простым методом наименьших квадратов второго порядка, показывающего наименьшую статистическую ошибку по сравнению с регрессионными моделями других порядков (см. рисунок 5).

Малое количество измерений связано с труднодоступностью пассивных заготовок, однако стоит иметь ввиду, что на момент публикации текста данные могут пополняться, а уравнение уточняться. Однако уже здесь можно заметить тенденцию изменений обратного отражения от входного параметра. Откорректированное эталонное измерение можно получить следующим образом:

$$P_{standart}' = \frac{P_{standart}}{\kappa(d)} , \quad (11)$$

даже при достаточно большом разбросе исходных малых по количеству данных модели, такой подход увеличит адекватность результатов.

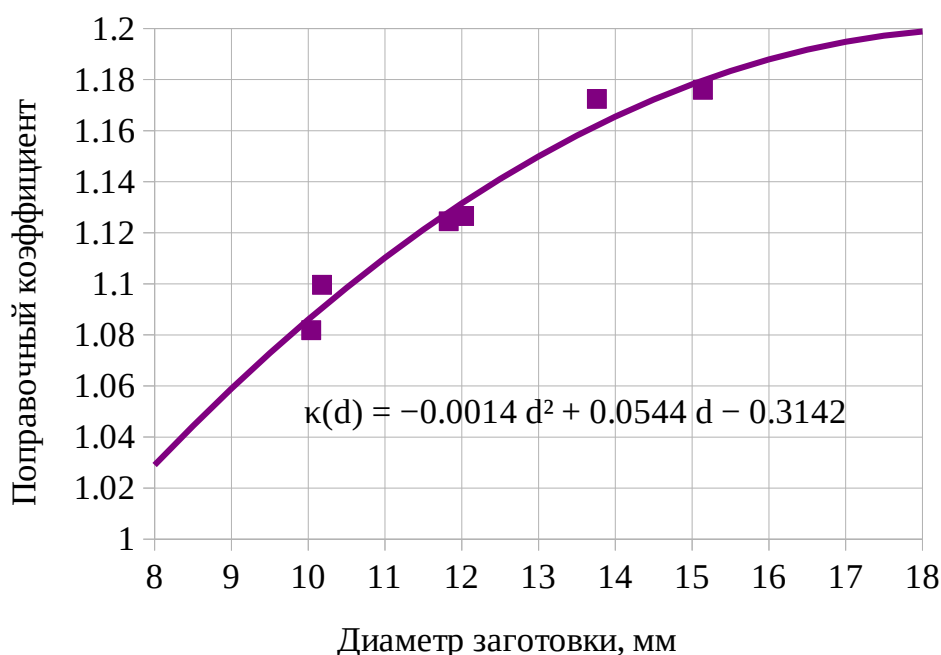


Рисунок 5 — График и уравнение поправочного коэффициента эталонного измерения мощности накачки, учитывающего обратное френелевское отражение и рэлеевское рассеяние в поверхности заготовки

В третьей главе рассматривается сконструированная автоматизированная система управления контролем однородности концентрации активной легирующей примеси. Здесь основным звеном является микроконтроллер, который на низком уровне интерпретирует формализованные управляющие сигналы (команды), посылаемые персональным компьютером, в конкретные действия. Структура рассматриваемой системы управления показана на рисунке 6.

Для достижения повторяемости результатов в систему были включены два шаговых двигателя (XY), которые в рамках одного поперечного сечения настраивают фотоприёмник и диод накачки на максимум излучения, который соответствует юстировке системы точно на оптическую ось сердцевины. Шаг движения по обеим осям имеет порядок 10–15 мкм (фотоприёмник — 10 мкм/шаг, накачка — 15 мкм/шаг), что позволяет достаточно точно настроить систему на подобную структуру диаметра того же порядка.

Посредством метода дихотомии с постепенным уменьшением скорости двигателей реализован поиск максимума. Найденная таким способом координата считается оптимальной точкой для дальнейшего исследования заготовки. В иных случаях отклонение луча диода от оптической оси сердцевины повлечёт за собой уменьшение мощности.

Ограничивают движение по осям концевые выключатели, находящиеся на крайних возможных положениях системы по каждой из осей (XYZ) и также контролируемые микроконтроллером.

Измерительные каналы системы представляют собой фотоприёмники, чувствительные к излучению в инфракрасном диапазоне. Фотодетектор измерительного канала регистрирует излучение люминесценции на длине волны 1550 нм. Фотодетектор опорного измерительного канала фиксирует мощность

люминесценции при постоянном коэффициенте ответвления, обеспечиваемом инвариантностью рэлеевского рассеяния по отношению к оптической поляризации излучения накачки в данном оптическом элементе. Результатом является фиксация изменения мощности накачки и коррекции мощности люминесценции согласно этой флуктуации.

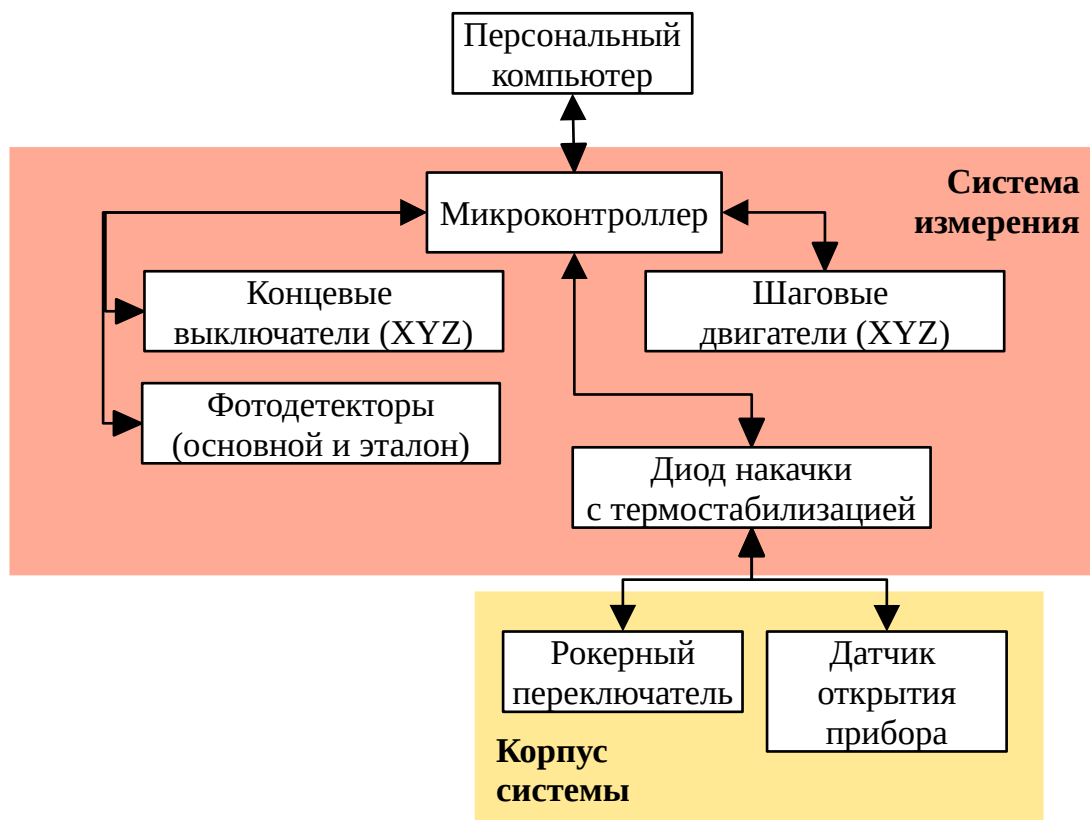


Рисунок 6 — Структура системы управления измерениями концентрации активных ионов в составе сердцевины заготовки

Помимо опорного измерения в систему встроена эталон-заготовка с известной концентрацией контролируемой активной примеси (см. рисунок 7). Её отличие от обычной заготовки в том, что вместо процесса вытягивания, её сегментируют на три части. Затем два крайних сегмента измеряются разрушающим методом на рентгенооскопе с дальнейшим получением концентрации активной примеси. Если размер целевой центральной части заготовки небольшой, то можно считать её концентрацию $C_{standart}$ равной среднему арифметическому концентраций ранее отделённых и измеренных крайних сегментов.

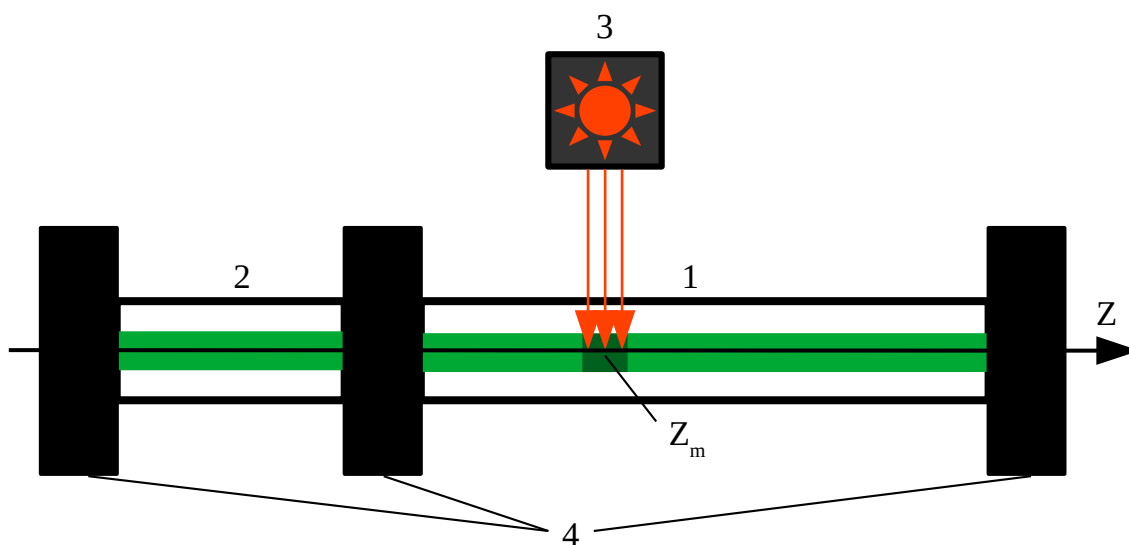


Рисунок 7 — Иллюстрация измерений при наличии эталона заготовки.

1 — измеряемая заготовка, 2 — эталон заготовки, находящийся на той же оси Z , что и измеряемая заготовка, 3 — лазерный диод накачки, 4 — крепления для заготовок. Z_m — координата измеряемой области на оси Z

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

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

Этап 5: Расчёт концентрации в указанном сечении заготовки

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

В четвёртой главе рассматриваются результаты эксплуатации автоматизированной системы управления. На первом этапе используемая методика была верифицирована с помощью измерений на сертифицированном комплексе, реализующем рентгеноскопический метод. Заранее измеренная заготовка была сегментирована на 4 части и измерена на эталонном приборе. На рисунке 8 проиллюстрированы измерения на обоих приборах. Расхождение не превышает 5% , что говорит об адекватности рассматриваемой в работе методики в целом (см. рисунок 8).

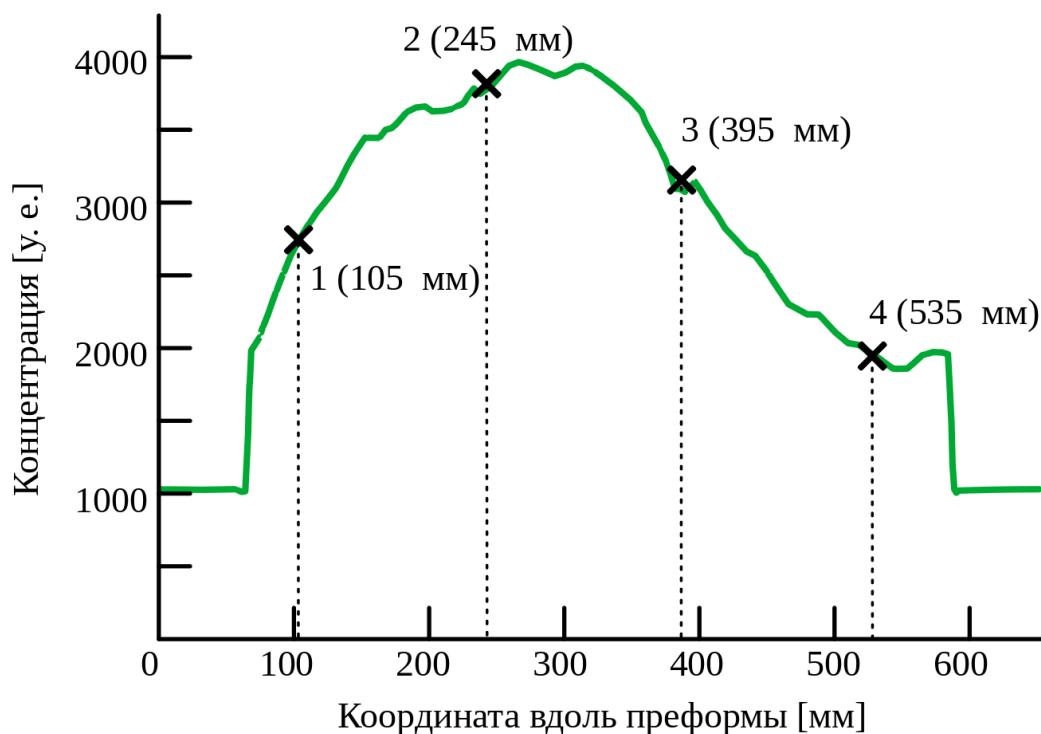


Рисунок 8 — Данные об измерении концентрации активной примеси в заготовке волоконного световода. Линия — измерения, полученные рассматриваемой автоматизированной системой. Отмеченные участки — измеренные разрушающим рентгеноскопическим методом цилиндрические фрагменты заготовки

Благодаря системе компенсации, работающей в реальном времени, и прецизионному позиционированию шаговых двигателей удалось добиться высокой повторяемости. В примере (см. рисунок 9) представлены скомпенсированные измерения (напряжение на выходе фотоприёмника в мВ), которые при расчёте дают максимальную ошибку до 4.36% (в зависимости от выбранной точки длины заготовки).

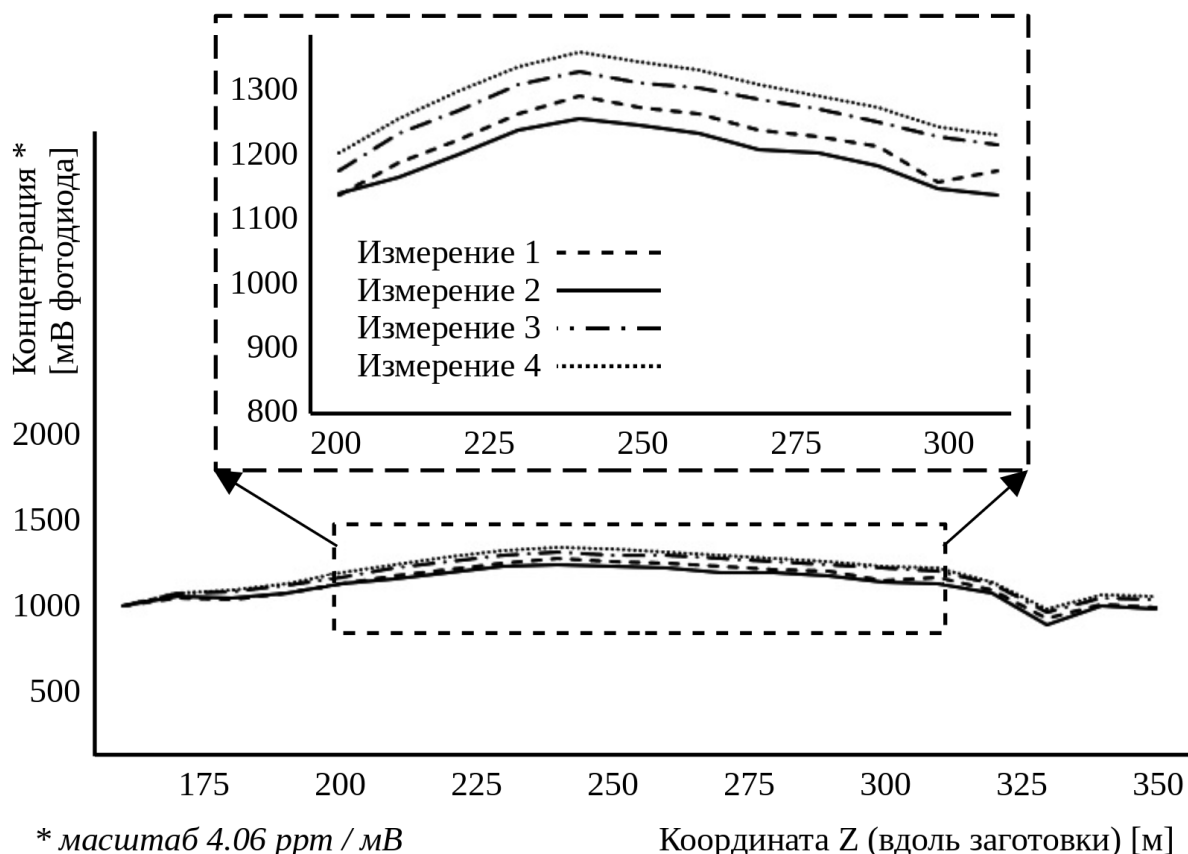


Рисунок 9 — Графики четырёх измерений распределения концентрации ионов эрбия в сердцевине заготовки вдоль её длины

Как результат, такая система должным образом позволяет уже в настоящее время осуществлять качественную и количественную оценку производственных заготовок. Более того, наличие такого этапа промежуточного контроля позволило удешевить производство своевременной отбраковкой некондиции.

Также прецизионное позиционирование позволило использовать систему научных исследований, реализующую томографию осевых сечений заготовки. С учётом осевой симметрии заготовок по профилю концентрации измерения могут осуществляться для одного объекта сразу по двум осям. Первая ось вдоль длины заготовки — Z , вторая, перпендикулярная первой — Y . Такие данные включают в себя соответствующее распределение ионов. Результаты дают более точные данные о геометрии активной части сердцевины, они позволяют подробнее изучить непосредственно процесс производства. Данный режим позволяет проводить научные исследования, касающиеся результирующего распределения ионов после производства методом MCVD. Подобные измерения проиллюстрированы на рисунке 10.

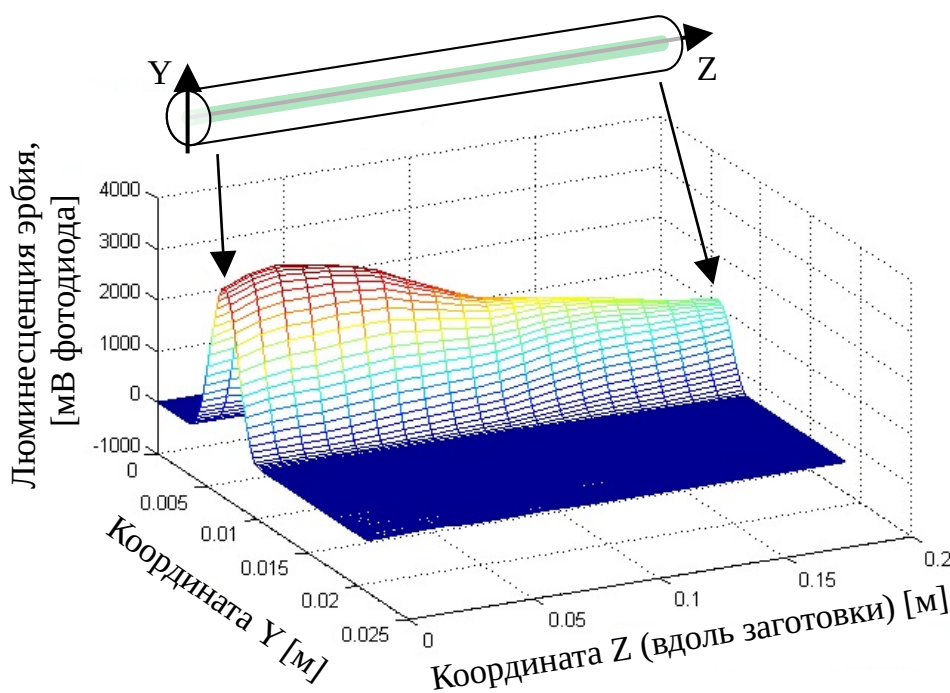


Рисунок 10 — Визуальная обработка файла данных режима полного измерения. Ось Y — координата осевого сечения заготовки, перпендикулярная оси заготовки, ось Z — координата вдоль длины заготовки

Ещё одним аспектом эксплуатации прибора стало его использование в образовательной деятельности при демонстрации люминесцентных свойств сердцевины, легированной активными ионами.

В заключении описаны основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в ведущих научных изданиях:

1. **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. **(ВАК 2.3.3.)**

2. **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. - С. 129564. - DOI 10.1016/j.optcom.2023.129564. **(Web of Science, Scopus)**

3. 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). - С. 176-194. - DOI 10.3390/opt5010013. **(Web of Science, Scopus)**

4. 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. - №5 (64). - С. 768-775. - DOI 10.1134/S0020441221050031. **(Web of Science, Scopus, ВАК)**

5. 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. - №4 (63). - С. 481-486. - DOI 10.1134/S0020441220050012. **(Web of Science, Scopus, ВАК)**

6. 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. - №4 (9). - С. 47-58. - DOI 10.26583/sv.9.4.05. **(Scopus, ВАК)**

7. 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. - №6 (51). - С. 582-586. - DOI 10.3103/S8756699015060096. **(Web of Science, ВАК)**

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

8. 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.**

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022660503 Российская Федерация. erbiumCalc : № 2022660112 : заявл. 06.06.2022 : опубл. 17.06.2022 / **К. П. Латкин**.

Публикации в других изданиях:

10. Белокрылов, М. Е. Рефлектометрический метод измерения длины активных волоконных световодов / М. Е. Белокрылов, Ю. А. Константинов, **К. П. Латкин**, Клод Д., Д. А. Селезнев, А. А. Стёпин, Ю. А. Конин, В. А. Щербакова, Р. Р. Кашина // Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика - 2020 : Сборник тезисов докладов, Пермь, 23-24 сентября 2020 года. - Пермь: Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, 2020. - С. 29-30.

11. **Латкин, К. П.** Аналитическая оценка мощности люминесценции ионов эрбия в преформе активного волоконного световода / **К. П. Латкин**, А. С. Смирнов, В. В. Бурдин // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. - 2020. - №4. - С. 41-46. - DOI 10.7242/2658-705X/2020.4.3.

12. Белокрылов, М. Е. Комплексный охват проблематики создания оптоэлектронных устройств на примере элементной базы волоконно-оптических датчиков / М. Е. Белокрылов, А. И. Кривошеев, **К. П. Латкин**, Ф. Л. Барков, В. В. Бурдин, Ю. А. Константинов, Р. С. Пономарев // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. - 2020. - №4. - С. 55-61. - DOI 10.7242/2658-705X/2020.4.5.

13. **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.

14. **Латкин, К. П.** Метод измерения абсолютной концентрации ионов эрбия в преформе активного волокна / **К. П. Латкин**, А. С. Смирнов, Ю. А. Константинов, В. В. Бурдин // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. - 2018. - №4. - С. 21-26. - DOI 10.7242/1998-2097/2018.4.3.

15. **Latkin, K. P.** The precision analysis of results obtained by the method of concentration homogeneity control along the preform / **K. P. Latkin**, A. S. Smirnov // Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности. - 2017. - №1. - С. 27-31.

16. **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.

17. **Латкин, К. П.** Оценка равномерности распределения ионов эрбия вдоль преформы активного оптического волокна по интенсивности люминесценции на разных длинах волн / **К. П. Латкин**, А. С. Смирнов, Ю. А. Константинов, В. В. Бурдин // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. - 2015. - №3. - С. 4-11.

18. Смирнов, А. С. Спектроскопический метод измерения однородности концентрации эрбия вдоль длины активной оптической заготовки / А. С. Смирнов, **К. П. Латкин**, В. В. Бурдин // Научные исследования и инновации. - 2014. - № 2. - С. 62.

19. Smirnov, A. S. Method for estimating the efficiency rate of an exciting energy transfer between Ytterbium and Erbium ions in a preform / A. S. Smirnov, **K. P. Latkin**, A. S. Kurkov // Инновационные процессы в исследовательской и образовательной

деятельности. - 2014. - №1. - С. 151-152.

20. **Латкин, К. П.** Метод измерения однородности концентрации активной легирующей присадки вдоль длины активной оптической заготовки / **К. П. Латкин, А. С. Смирнов** // Прикладная математика, механика и процессы управления. - 2014. - №1. - С. 106-108.

21. 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.