

На правах рукописи



Романова Мария Андреевна

**ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ И СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ
НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА**

Специальность 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) и в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Смирнов Серафим Всеволодович

Официальные оппоненты: **Будак Владимир Павлович,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры светотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Валиев Дамир Талгатович,
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент отделения материаловедения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет»

Защита состоится 17 июня 2025 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУРа, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа (г. Томск, ул. Красноармейская, 146) и на сайте ТУСУРа: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/ldito7b9>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.415.01, доктор физ.-мат. наук



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Полупроводниковые источники белого света на основе кристаллов нитрида галлия, его твердых растворов и люминофора находят широкое применение в современных осветительных системах. За последние десятилетия достижения в области технологии создания полупроводниковых источников света позволили существенно нарастить объем их производства и соответственно снизить себестоимость.

Временная стабильность основных световых и колориметрических параметров полупроводниковых источников света (световой поток, световая отдача, цветовая температура), а также их ресурс работы и устойчивость к отказам определяются в том числе, и эффективным теплоотводом, обеспечивающим их корректный тепловой режим работы. При обеспечении корректного теплового режима работы полупроводниковых источников света в составе светодиодных модулей осветительных устройств задача усложняется, т.к. имеет место тепловое влияние соседних полупроводниковых источников света друг на друга и элементов драйвера питания светотехнического устройства. Этим обусловлена необходимость проводить анализ распределения температурных полей по всей площади поверхности светодиодного модуля светотехнического устройства, а не ограничиваться только точечными замерами температуры.

В условиях ограниченной конвекции в герметичном корпусе большое количество выделяемого тепла может привести к неоптимальным рабочим температурам и сокращению срока службы светодиода. Это особенно важно для современных мощных осветительных устройств со светодиодными модулями большой площади, где весьма вероятны локальные перегруженные по температуре области. Выявление таких областей и возможность определения температурных градиентов - важные условия оптимизации конструкции, улучшения теплового регулирования и, в конечном итоге, повышения функциональных характеристик, ресурса и надежности полупроводниковых источников света.

Таким образом, мониторинг тепловых характеристик полупроводниковых источников света, определение тепловых режимов работы элементов светодиодных модулей для отслеживания их состояния, прогнозирования времени выхода из строя в реальных условиях, а также для оперативного выявления и замены неисправных световых приборов является актуальной и востребованной задачей.

Степень разработанности темы.

В настоящее время ведутся активные исследования как в области разработки энергоэффективных светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников света, так и в области методов и алгоритмов измерения характеристик полупроводниковых источников света и контроля режимов работы устройств в процессе их эксплуатации.

Развитие полупроводниковых источников света во многом обязано фундаментальным исследованиям, проведенным Ж.И. Алферовым, Ж. Панковым, И. Акасаки, Х. Аmano и другими учёными, заложившими основы гетероструктур и нитридных материалов. Важный вклад в изучение тепловых эффектов в светодиодах внесли Ш. Накамура, Ф.Е. Шуберт, Б.Ф. Тринчук, А.Э. Юнович и многие другие, посвятившие свои работы вопросам терморегуляции, перегрева и надёжности полупроводниковых источников света.

За последние 20 лет было разработано множество методик измерения температуры р-п перехода светодиода, что привело к значительному улучшению их характеристик, повышению их эффективности и отдаваемой световой мощности. Тем не менее, точное определение температуры р-п перехода светодиода остается важным направлением исследований. Среди существующих методов измерения температуры преобладают те, которые основаны на оптических и электрических свойствах светодиодов или предполагают физический контакт с измерительным прибором. Однако эта задача далеко не простая, так как большинство светодиодных модулей включают в свой состав линзы поверхностного монтажа, покрытия компаундами с люминофорными композициями и т.д., что создает проблемы для прямого измерения температуры светодиода.

Рядом отечественных исследователей были разработаны бесконтактные методы измерения температурных параметров дискретных полупроводниковых источников света. Так, Ф.И. Маняхин специализируется на исследованиях зонной структуры светодиодных гетероструктур и разработке нового способа измерения температуры р-п перехода по динамике падения напряжения. Однако, разработанный способ сложно масштабировать для одновременного контроля температуры множества светодиодов в составе светодиодного модуля. Метод бесконтактного измерения температуры кристалла светодиода с использованием температурной зависимости ширины линий спектра излучения кристалла и люминофорного покрытия полупроводниковых источников света на уровне 0,5 от максимума, был предложен С.В. Смирновым. Однако, данный метод требует модернизации для бесконтактного измерения температуры активной области полупроводниковых источников света в составе осветительных устройств в связи с тем, что в осветительных устройствах имеются дополнительные внутренние источники тепла.

Таким образом, методы бесконтактного измерения температуры полупроводниковых источников света именно в составе светотехнических устройств на данный момент не проработаны в полной мере.

Объект исследования: полупроводниковые источники света, светотехнические устройства и другие технические объекты с внутренними источниками тепла.

Предмет исследования: тепловые режимы и распределение температурных полей по объему светотехнического устройства на основе полупроводниковых источников света.

Целью диссертационной работы является разработка бесконтактных методов контроля температуры полупроводниковых источников света, а также методов построения температурных полей поверхности светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников света.

Для достижения указанной цели диссертационной работы необходимо решить следующие задачи:

- 1) исследовать влияние температуры на основные электрические, фотометрические и колориметрические характеристики полупроводниковых источников света;
- 2) разработать бесконтактные методы контроля температуры активной области полупроводниковых источников света;
- 3) провести апробацию разработанных бесконтактных методов контроля температуры в сравнении с традиционными контактными методами и с результатами компьютерного моделирования;
- 4) провести апробацию разработанных бесконтактных методов контроля температуры при исследовании иных объектов с внутренними источниками тепла.

Научная новизна заключается в следующем:

- 1) *разработан* новый бесконтактный спектральный метод измерения температуры активной области кристаллов полупроводниковых источников света, находящихся в конструкции осветительных устройств, *позволяющий* проводить бесконтактное измерение температуры активной области полупроводниковых источников света в составе осветительных устройств с погрешностью, не превышающей $\pm 3\text{K}$.
- 2) *разработан* оригинальный метод исследования теплового режима источников света осветительных устройств путем совместного использования термографии и спектromетрии, *отличающийся тем, что* данный метод позволяет достоверно воссоздать картину внутренних тепловых полей в светотехническом устройстве.
- 3) впервые *предложен* алгоритм определения энергетических параметров источников тепла и восстановления модели распределения температуры внутри осветительного устройства по измеренной тепловизионной карте поверхности осветительного устройства.

Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается использованием их при выполнении научно-исследовательских работ по темам: «Разработка методического и нормативного обеспечения создания и внедрения перспективных технологий

интеллектуальной автоматизации управления функционированием беспилотных авиатранспортных систем в обеспечение приемлемого уровня безопасности полетов» (шифр «ИАТ БАТС - 2023»); «Теоретические исследования и экспериментальная разработка оптической приставки для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов» (соглашение с Минобрнауки России № FEWM-2024-0004 от 17.01.2024 г.).

В рамках диссертационного исследования разработаны бесконтактные методы температурного контроля кристалла, применимые в производстве и эксплуатации полупроводниковых источников света, а также светотехнических устройств на их основе. Кроме того, созданный алгоритм определения параметров тепловых источников и восстановления температурного распределения на основе тепловизионных карт позволяет не только рассчитывать температурное поле и строить тепловую модель наблюдаемого объекта, но и выявлять его неисправные элементы и скрытые зоны тепловыделения.

Методология и методы исследования. В диссертационном исследовании совместно применялись экспериментальные и теоретические методы. Исследования с использованием экспериментальных методов предусматривали вычисление основных параметров полупроводниковых источников света и их последующее сопоставление с результатами практических испытаний. Теоретический анализ включал создание тепловых моделей и изучение нормативных документов, справочных материалов и научных источников. В работе применялись методы математической статистики и цифровой обработки изображений, а также математическое моделирование.

Положения, выносимые на защиту

1) Температурные зависимости полуширины спектра излучения кристалла и полуширины спектра излучения люминофора могут быть эффективно использованы для бесконтактного измерения температуры активной области полупроводниковых источников света в составе осветительных устройств с погрешностью, не превышающей $\pm 3\text{K}$.

2) Термография поверхности в комплексе со спектральным методом измерения температуры активных элементов, позволяет воссоздать картину внутренних тепловых полей в светотехническом устройстве.

3) Предложенный алгоритм выявления внутренних источников тепла и их температуры из карты тепловизионного контроля технических объектов с внутренними источниками тепла позволяет достоверно построить объемное распределение температуры в глубине объекта по измеренным значениям поверхностных температур.

Личный вклад автора диссертационной работы. Планирование и проведение экспериментальных исследований, анализ и интерпретация полученных результатов, формулирование выводов и разработка программного обеспечения осуществлялись лично автором. Постановка задач исследования и основные положения были сформулированы совместно с научным руководителем работы доктором технических наук, профессором С.В. Смирновым. Научный руководитель также оказывал консультативное содействие и осуществлял верификацию результатов в процессе выполнения работы. Апробация и тестирование выполнены совместно с Ю.С. Гончаровой и К.В. Коротковой.

Достоверность научных результатов подтверждается согласованностью с теоретическими и экспериментальными данными, опубликованными в научно-технической литературе; обеспечивается организацией опытно-экспериментальной работы с применением методов, соответствующих предмету, целям и задачам исследования, а также подтверждается устойчивой повторяемостью основных результатов научных исследований.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, среди них: XI Международная научно-практическая конференция. «Электронные средства и системы управления», Томск, 2015; XII Международная научно-практическая конференция. «Электронные средства и системы управления», Томск, 2016; Российская научно-техническая конференция с международным участием «Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех - 2017)», Москва, 2017 года; XVI Международная научно-техническая конференция

«Научный форум: технические и физико-математические науки», Москва, 2018; 12th International Conference «Management of Large-Scale System Development» (MLSD), Москва, 2019; XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ XIII), Москва, 2019; 15th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings», Singapore, 2020; 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, 2020; 15th International Conference «Management of Large-Scale System Development» (MLSD), Москва, 2022.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 17 работ: 4 статьи в журналах из перечня ВАК, 2 статьи в журнале, проиндексированном в Scopus, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 10 тезисов докладов в трудах международных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и трёх приложений. Объём работы составляет 167 страниц, включая 73 рисунка, 12 таблиц и списка литературы из 169 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении доказана актуальность диссертационной работы на основе проведенного аналитического обзора научно-технической литературы, сформулированы цель и задачи работы, а также приведены научные положения, выносимые на защиту. Определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко изложены структура и содержание диссертационной работы.

В первой главе представлен обзор современной научно-технической литературы по теме диссертационного исследования, связанного с обеспечением требуемого теплового режима полупроводниковых источников света в светотехнических устройствах. Показано, что создание надёжных и энергоэффективных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств на их основе напрямую связано с обеспечением корректного теплового режима их работы. Однако при решении задачи отвода тепла всегда возникает риск увеличения массогабаритных характеристик устройств, поскольку отсутствуют единые принципы проектирования, позволяющие заранее определить необходимую конструкцию устройства с учётом требуемых технико-экономических показателей (эффективности теплоотвода, массы и габаритов).

Рассмотрены исторические аспекты и общие принципы функционирования полупроводниковых светодиодов, в том числе полупроводниковых источников белого света. Описаны различные конструкции кристаллов (планарная, вертикальная, flip-chip), выявлены основные достоинства данных устройств: высокая энергоэффективность и длительный срок службы. Рассмотрены методы получения белого света на базе гетероструктурных светоизлучающих диодов: смешение нескольких цветов (RGB) и применение люминофоров (например, YAG:Ce). Указано, что широкое распространение (в том числе по причине экономической эффективности) получили полупроводниковые источники света с люминофорными покрытиями.

В рамках обзора показано, что одним из ключевых факторов, влияющих на срок службы полупроводниковых источников света на основе гетероструктуры InGaN/AlGaN/GaN, является поддержание требуемой температуры в активной области, определяемой тепловым режимом работы светотехнического устройства. В связи с этим рассмотрены различные методы контроля тепловых процессов в полупроводниковых источниках света, в том числе на основе теплового сопротивления «кристалл–окружающая среда» и бесконтактные методы (спектрометрический и тепловизионный контроль). Показано, что использование этих методов в сочетании с численными алгоритмами решения уравнения теплопередачи при наличии внутренних источников тепла позволяет формировать трёхмерные модели распределения термодинамической температуры и выявлять локальные зоны перегрева внутри конструкций полупроводниковых источников света. Существующие алгоритмы восстановления объёмного поля температуры по измеренным значениям поверхностных

температур, которые могут применяться как для мониторинга текущего теплового режима, так и для прогнозирования ресурса работы (наработки на отказ) светотехнических устройств.

На основании проведенного обзора научно-технической литературы по теме диссертационного исследования сформулирована цель работы и определены необходимые для ее достижения задачи.

Вторая глава содержит описание исследуемых полупроводниковых источников света (КИПД-154, ЛПМ 26 и светодиодного модуля STDЛ28-LX5050) с указанием их конструктивных особенностей и основных технических параметров. Описаны приборы и оборудование, применяемые для измерения электрических, спектральных, фотометрических и колориметрических характеристик объектов исследования: интегрирующая сфера, спектрометры, термопара, тепловизор и др.

Представлены методики проведения экспериментов, направленных на исследование температурных полей и влияния тепловых режимов на эксплуатационные характеристики полупроводниковых источников света, в том числе:

- методика определения зависимости интенсивности светового потока и координат цветности от температуры активной области кристалла (включая расчёт теплового сопротивления и ОЦЕНКИ температуры бесконтактным способом);

- методика измерения спектральных характеристик (ширина спектра, пиковая длина волны) при различных значениях тока и при изменении температуры корпуса кристалла, а также использования калибровочной зависимости для вычисления температуры р-п-перехода;

- методика измерения температурных полей на поверхности объектов с помощью тепловизора и дальнейшего анализа распределения температуры для выявления локальных зон перегрева или конструктивных дефектов.

Описан созданный оптико-электронный комплекс для бесконтактных исследований температуры источников света (рисунок 1).



Рисунок 1 – Внешний вид комплекса для бесконтактных измерений температуры источников света

Оптико-электронный комплекс состоит из спектрометра AvaSpec-2048, обеспечивающего измерение спектра излучения исследуемого источника света с оптическим разрешением на уровне 0,04 нм в спектральном диапазоне от 200 нм до 1100 нм, генератора прямоугольных импульсов, запоминающего осциллографа и регистрирующего устройства. Модульная конструкция прибора позволяет на ее основе перестроить измерительную систему под различные экспериментальные требования. Для анализа измерений используется

специализированное программное обеспечение AvaSoft, предварительно установленное на компьютере.

Использование указанных методик и оборудования позволяет получить обобщенные данные о тепловых, светотехнических и спектральных параметрах полупроводниковых источников света, необходимых для оценки их теплового режима и его оптимизации (при необходимости).

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований влияния теплового режима при работе светотехнических устройств на температуру и изменение характеристик составных компонент полупроводниковых источников света. Представлено описание бесконтактных методов определения температуры активной области кристаллов полупроводниковых источников света.

Установлена взаимосвязь температуры активной области полупроводникового кристалла и полуширины спектра его излучения. Выявлено, что при повышении температуры максимальная длина волны света сдвигается в сторону длинных волн, а спектр уширяется, что позволяет использовать значение полуширины спектра в качестве термочувствительного показателя. Показано, что данный метод возможно использовать и для оценки температуры р-п-перехода в сложных светотехнических устройствах на основе полупроводниковых источников света.

Ширина запрещённой зоны E_g полупроводника – ключевой параметр, определяющий спектр излучения, уменьшается с ростом температуры. Зависимость E_g от температуры обычно описывается эмпирической формулой для структур GaN/InGaN имеет вид:

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T - \beta T^2, \quad (1)$$

где α, β – коэффициенты, зависящие от состава полупроводника (InGaN, AlGaN и др.); T – температура (К).

Экспериментально установлено, что в реальных гетероструктурах (например, GaN–InGaN с квантовыми ямами) эффект сложнее: помимо $\Delta E_g(T)$ появляются вклады от квантово-размерных уровней и деформационных напряжений. Эффективное изменение запрещённой зоны может быть суммарно представлено как $\sim 3 \div 4 \cdot kT$, при этом температурные сдвиги описываются эмпирически с помощью коэффициентов, что дает линейный сдвиг на доли нм/°С. На рисунке 2 показано, как нагрев активной области полупроводникового источника света приводит к размытию спектра: спектральные линии «теряют» чёткие границы и «растягиваются».

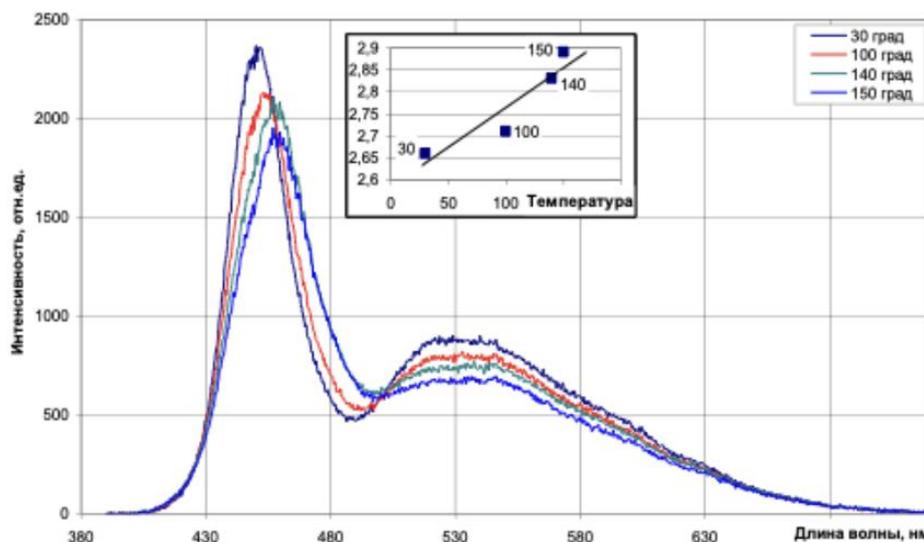


Рисунок 2 – Характерные закономерности изменения формы спектров при разных температурах

Экспериментальные и аппроксимирующие зависимости полуширины спектра (FWHM) от температуры корпуса кристалла для исследуемых полупроводниковых источников света приведены на рисунке 3.

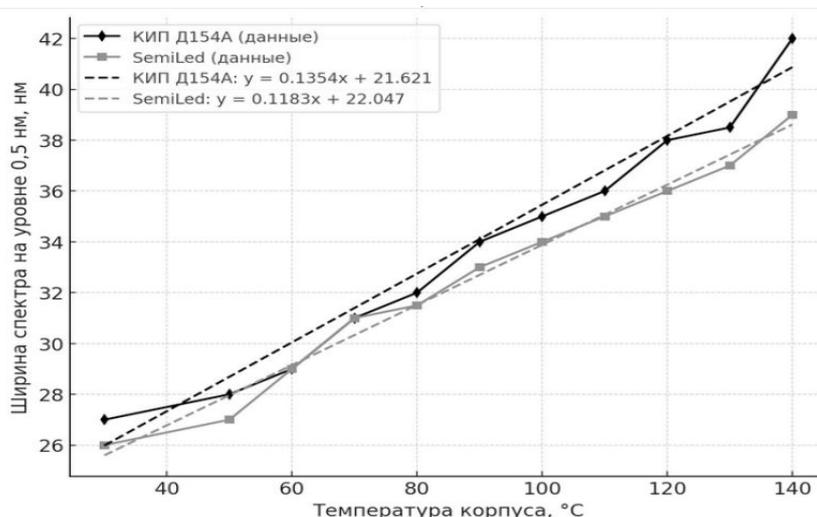
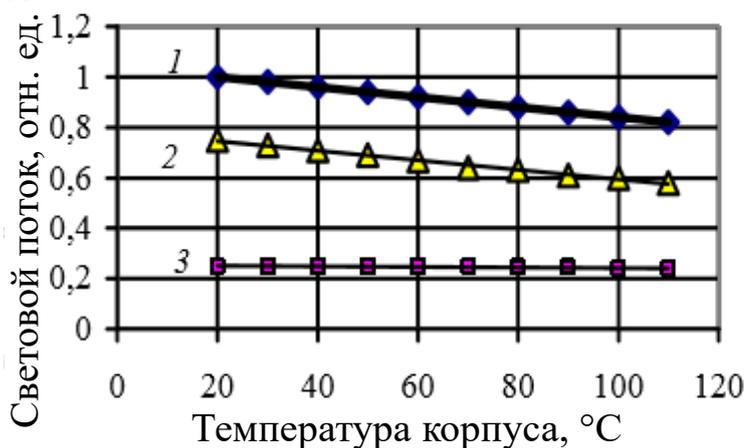


Рисунок 3 – Калибровочные зависимости полуширины спектров излучения исследуемых образцов

Таким образом, полуширина спектра излучения и положение его основного пика могут быть использованы для определения температуры активной области кристалла полупроводникового источника света.

Повышение рабочей температуры отрицательно сказывается на выходном световом потоке белых светодиодов. Исследование зависимости полного светового потока полупроводникового источника света от температуры и его составляющих показало, что с увеличением нагрева, прежде всего, падает эффективность люминесценции люминофора (рисунок 4). В частности, при нагреве полупроводникового источника света (КИПД-154) с 25 °C до 85 °C полный световой поток снижается главным образом за счёт компоненты люминофора (500–800 нм), тогда как вклад синей компоненты (420–480 нм) меняется меньше.



- 1 – полный световой поток
- 2 – световой поток в диапазоне длин волн от 500 до 800 нм
- 3 – световой поток в диапазоне длин волн от 420 до 480 нм

Рисунок 4 – Зависимость светового потока полупроводникового источника света от температуры

В ходе исследований установлено, что люминофорное покрытие имеет температуру на 10–15 °C выше температуры кристалла. Такое увеличение температуры люминофора является

причиной его ускоренной деградации и приводит как к уменьшению интенсивности люминесценции, так и к сдвигу максимумов излучения в сторону более длинных волн. Помимо преобладающего температурного гашения люминесценции люминофора при увеличении температуры кристалла полупроводникового источника света в меньшей степени происходит снижение и его собственного светового потока из-за преобладания безызлучательной рекомбинации.

С учетом теоретических и экспериментальных данных определена уточненная температурная зависимость светового потока для светодиода с люминофорным покрытием:

$$I(T) \approx I(300K) \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right) \times \left[\exp(-\rho d) + \exp(-\alpha d) \left(\frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)} \right) \right], \quad (2)$$

где $I(300K)$ – световой поток при температуре кристалла 300 К; T_c – характеристическая температура кристалла (для GaN $T_c=1600$ К); A – константа тушения; E_a – кажущаяся энергия активации тушения люминесценции; η_0 – квантовый выход люминесценции при комнатной температуре.

Таким образом, рост температуры приводит к двум негативным эффектам: снижению собственного излучения кристалла и снижению эффективности преобразования этого излучения в видимый свет люминофором. В результате нагрева снижается полный световой поток белого светодиода и изменяется спектральный состав излучения (цветовая температура растёт за счёт ослабления «тёплой» компоненты), что ухудшает коэффициент цветопередачи и светотехнические характеристики полупроводникового источника света.

Определение температуры р-п-перехода светодиодного кристалла внутри устройства является нетривиальной задачей. Существующие методы не позволяют напрямую измерить температуру самого р-п-перехода, который может существенно превышать температуру корпуса светотехнического устройства. В связи с этим предложен бесконтактный спектральный метод контроля температуры кристалла, основанный на зависимости уширения спектра излучения от температуры. Для калибровки спектрального метода использовался режим импульсного питания светодиода короткими импульсами (1 мкс, 1000 Гц) – в этом режиме кристалл не успевает нагреваться. Данный бесконтактный метод позволяет в реальном времени оценивать температуру р-п-перехода внутри работающего светотехнического устройства (модуля или лампы). Кроме того, предлагается косвенный метод оценки температуры люминофора по измерению коррелированной цветовой температуры излучения светотехнического устройства. В работе показано, что цветовая температура значительно зависит от температуры и времени работы полупроводникового источника света и может служить индикатором нагрева люминофорного слоя. В совокупности эти методы обеспечивают контроль теплового режима: данные с термопары и тепловизора дают сведения о распределении температур на поверхности светотехнического устройства, а использование спектрального метода – о локальной температуре полупроводникового кристалла.

В качестве примера исследована приборная светодиодная лампа ЛПМ 26 (АО «НИИПП», г. Томск). Экспериментально характеристики лампы исследовались в температурной камере при внешней температуре от +25 °С до +100 °С. Температура кристаллов измерялась разработанным спектральным методом, а температура корпуса стабилизатора контролировалась термопарой. Для апробации предложенного бесконтактного метода измерения температуры кристаллов в светотехническом устройстве проводили путем измерения уширения спектра излучения светодиодов на уровне 0,5 от максимального значения при постоянном рабочем токе и последующего сравнения с уширением спектра при том же значении тока. Результаты эксперимента представлены на рисунке 5а. Наряду с этим по результатам экспериментов (на рисунке 5б) установлено, что тепловая мощность, выделяющаяся в светодиодном модуле, остается постоянной, при этом изменяется мощность рассеяния на стабилизаторе тока, за счет чего происходит повышение температуры всей конструкции лампы.

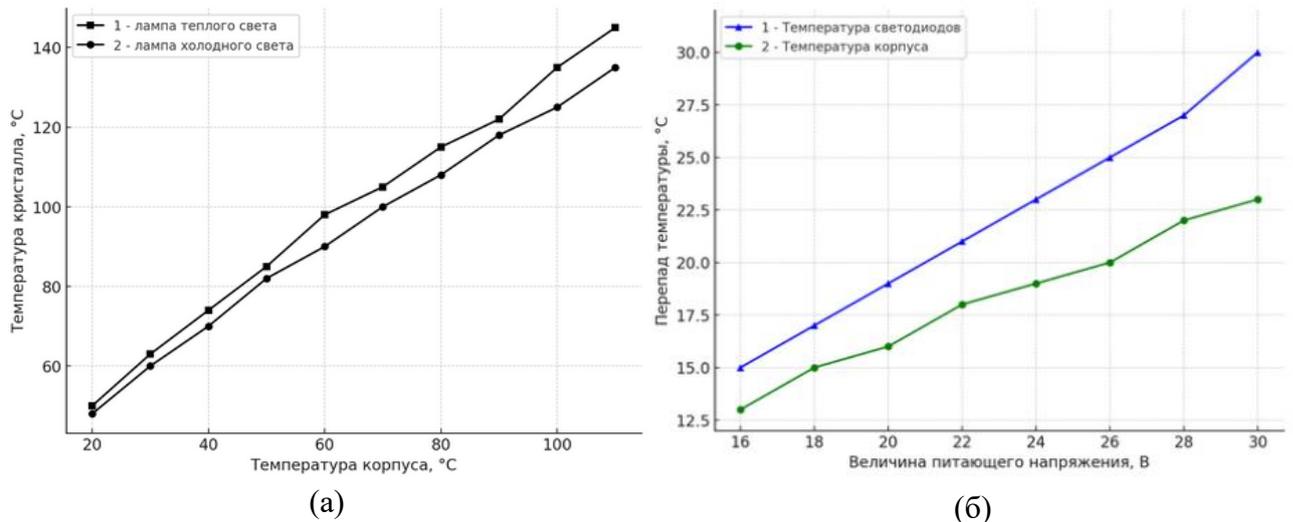


Рисунок 5 – Зависимость температуры кристалла от температуры корпуса для ламп «теплого света» и «холодного света» (а); Зависимость температуры светодиодов «1» и температуры корпуса «2» от величины питающего напряжения (б)

Температурная устойчивость лампы была оценена по предельным параметрам. Показано, что при температуре корпуса лампы +60 °C температура кристаллов не превышает +115 °C, что является допустимым (максимальная температура р-п-перехода для светодиодов составляет ~120–130 °C). Тепловой режим лампы ЛПМ 26 при штатных условиях (внешняя температура до +60 °C) обеспечивает работу светодиодов без превышения максимально допустимой температуры, однако при более высоких температурах окружающей среды или при повышенном напряжении питания область р-п-перехода сильно нагревается, что требует улучшенного теплоотвода для сохранения световых характеристик.

Для исследования теплового режима полупроводниковых источников света в составе светодиодного модуля выбрана конструкция, содержащая 32 светодиода LUXEON 5050 (рисунок 6).



Рисунок 6 – Исследуемый светодиодный модуль на радиаторе с вертикально ориентированными ребрами охлаждения

В результате экспериментов были выявлены температурные градиенты на поверхности модуля. Экспериментальная часть включала тепловизионные измерения, которые позволили сформировать визуальное распределение температуры в различных компонентах

светодиодных модулей (рисунок 7а и 7б), спектрометрический анализ (рисунок 8а), а также контактные измерения температуры с использованием термопар (рисунок 8б).

В совокупности зависимости показывают, как температура оказывает влияние на спектр, цветовую температуру и эффективность светодиодных модулей в целом.

Таким образом, температура р-п-переходов полупроводниковых источников света обусловлена внутренним выделением тепла при разогреве активной области гетероструктуры за счет безызлучательной рекомбинации и зависит от эффективности отвода тепла через элементы конструкции как самого полупроводникового источника света, так и – в целом – светотехнического устройства на их основе.

Определение температуры р-п-перехода полупроводникового источника света бесконтактным методом по полуширине спектра кристалла и полуширине спектра излучения люминофора имеет достаточную точность для оценки корректности заданного теплового режим работы полупроводникового источника света.

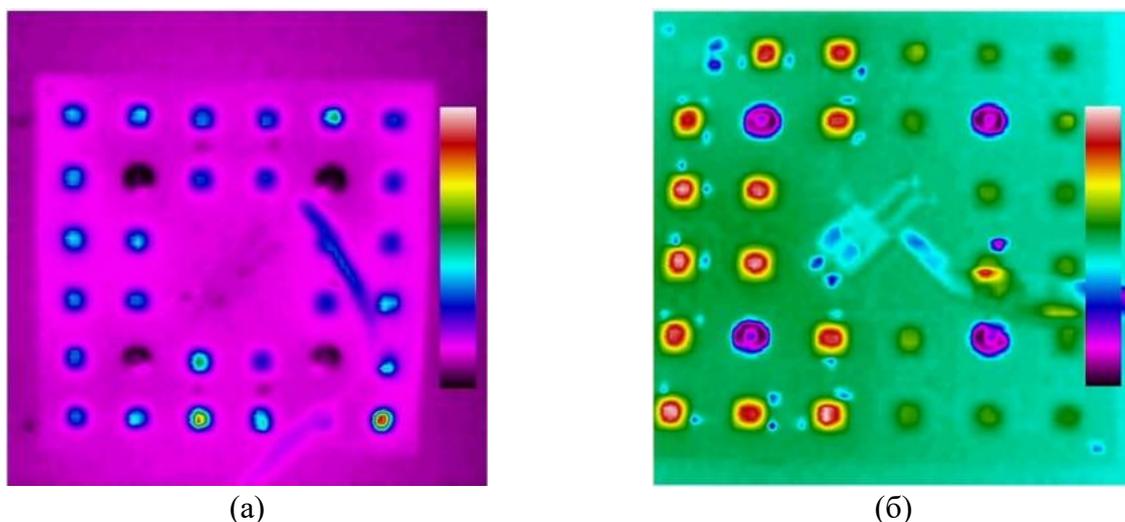


Рисунок 7 – Снимок экрана тепловизора в начале эксперимента (а); снимок экрана тепловизора после двух часов работы (б)

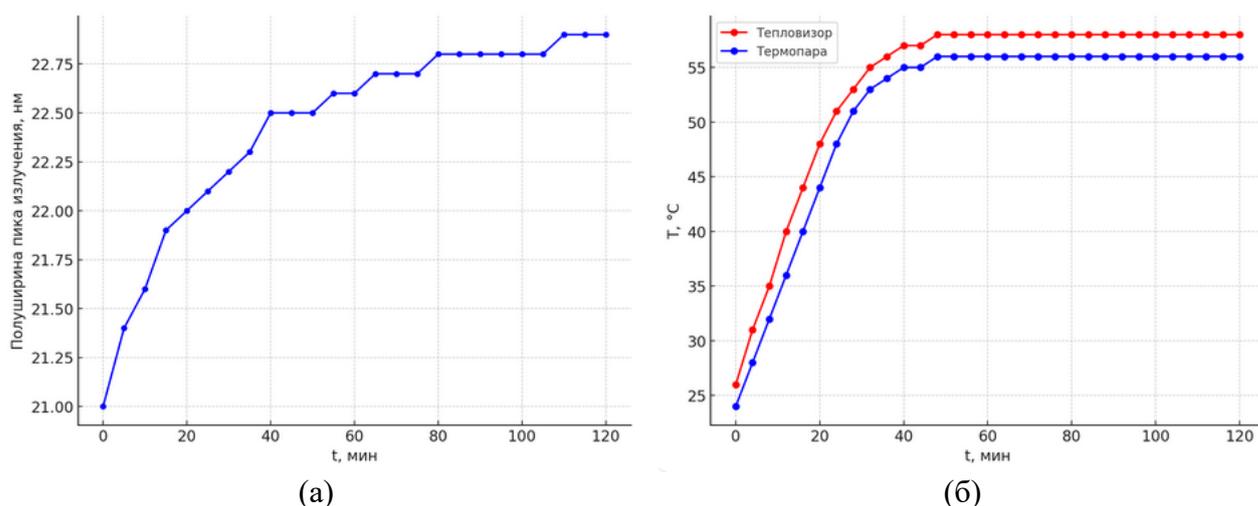


Рисунок 8 – Зависимость полуширины пика излучения от времени (а); зависимости температуры поверхности платы модуля от времени непрерывной работы (б)

Для оценки корректности теплового режима работы полупроводниковых источников света в составе светотехнических устройств (лампы и модули) необходима разработка дополнительных методов оценки поверхностных температурных полей. Для этого предлагается совместное использование метода термографии поверхности светотехнического устройства и метода спектрометрии (рисунок 9).

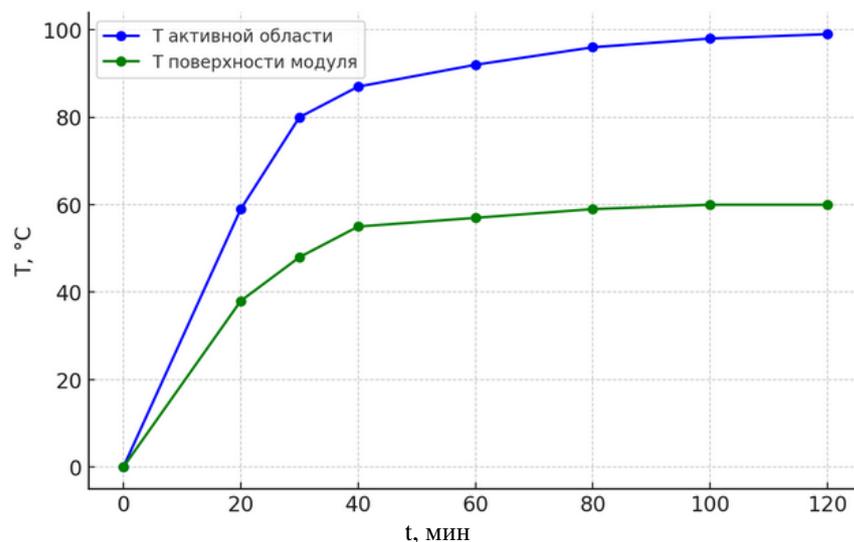


Рисунок 9 – Оценки температуры на поверхности светотехнического устройства спектрометрическим методом и на основе тепловизионного изображения

Как следует из рисунка 9 в светодиодном модуле существует значительный перепад температур между кристаллом и поверхностью. Для углубленного анализа было выполнено численное моделирование тепловых процессов в светодиодном модуле средствами COMSOL Multiphysics (модуль Heat Transfer). Была построена трёхмерная геометрическая модель всех элементов: светодиодных кристаллов (с корпусами), многослойной печатной платы и радиатора, помещённых в объём окружающего воздуха. На рисунке 10 представлена геометрия модели модуля.

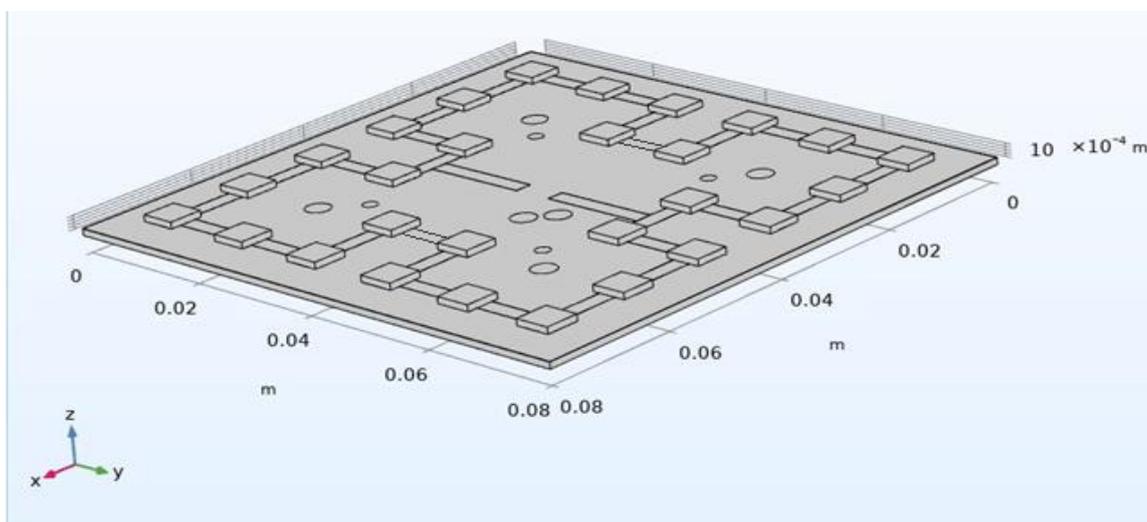


Рисунок 10 – Геометрическая модель светодиодного модуля в ПО COMSOL Multiphysics

Результаты моделирования прямой задачи теплопередачи представлены на рисунке 11. Моделирование осуществлялось с целью оценки корректности выбранного теплового режима работы полупроводникового источника света в составе светотехнического устройства.

Температура в точке измерения термопарой составила $T \approx 53 \text{ }^\circ\text{C}$, что представляет собой незначительное отклонение от экспериментальных данных, где температура составляла $T = 56 \text{ }^\circ\text{C}$. Значение температуры кристалла составило $T = 76 \text{ }^\circ\text{C}$, что демонстрирует высокую степень согласованности результатов моделирования с теоретическими расчетами. Совпадение результатов эксперимента и моделирования подтверждает адекватность выбранных параметров материала и граничных условий.

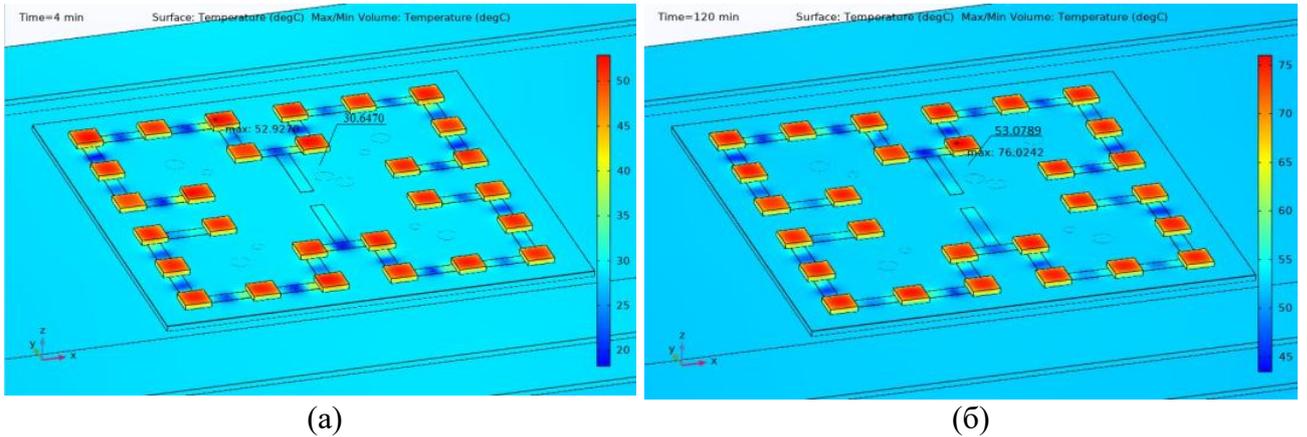


Рисунок 11 – Термический расчет в начале эксперимента (а) и в конце эксперимента $t = 120$ минут (б)

Визуализация распределения температуры в модели позволила также выявить локальные области перегрева. Это соответствует распределению температурных градиентов, наблюдаемых на тепловизионных изображениях. Таким образом, результаты математического моделирования методом конечных элементов подтверждены результатами натурального эксперимента и расчётов: в исследуемом светодиодном модуле при длительной работе каждый кристалл нагревается до $\sim 76^\circ\text{C}$ (при температуре окружающей среды $+20^\circ\text{C}$), что соответствует корректному тепловому режиму работы светотехнического устройства. Разработанная модель может быть использована для дальнейшей оптимизации конструкции светотехнических устройств (например, улучшения охлаждения наиболее горячих зон) без проведения трудоёмких натуральных экспериментов.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритма восстановления параметров источников теплового излучения объекта на основе его тепловой модели и значений температурных полей. Показано применение алгоритма для восстановления источников тепла для светотехнического устройства. Кроме того, проведена апробация алгоритма для восстановления термодинамического распределения температур почвы на глубину при решении задач экологического мониторинга.

На вход алгоритма подается:

- изображение поверхности светодиодного модуля, полученное с помощью тепловизора размером $n \times m$;
- максимальное и минимальное температурные значения с изображения T_{min} и T_{max} ;
- задаваемое пороговое значение температуры $T_{min} < T_{threshold} < T_{max}$;
- известные параметры моделируемого объекта: c (теплоёмкость), λ (теплопроводность), k (коэффициент теплоотдачи при конвекции) и ρ (плотность);
- время эксперимента (время непрерывной работы светодиодного модуля, с момента начала эксперимента до момента снятия изображения тепловизором), t_{exper} (в секундах).

Входное изображение преобразуется в индексированное изображение (в градациях серого), где цвет каждой точки (пикселя) представлен соответствующим значением температуры данной области на поверхности светодиодного модуля. Таким образом, на основе изображения, полученного с помощью тепловизора, формируется температурная карта поверхности светодиодного модуля:

$$T_{1[m \times n]} = \begin{pmatrix} T_1(x_1, y_1), T_1(x_2, y_2), \dots \\ T_1(x_m, y_n) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $T_1(x_m, y_n)$ – значение температуры пикселя с координатами x_m, y_n .

Осуществляется уменьшение исследуемой области поверхности светодиода: формируются массивы координат, значение температуры в которых больше задаваемого температурного порога: $X^* = (x_1, x_2, \dots, x_{m^* < m})$, $Y^* = (y_1, y_2, \dots, y_{n^* < n})$,

$\forall x \in X^*, \forall y \in Y^*: T_{(x,y)} \geq T_{threshold}$. Таким образом, при решении обратной задачи передачи тепла (восстановлении местоположения и параметров источников тепла светодиодного модуля) на этапе моделирования будут рассматриваться только те области поверхности светодиодного модуля, температура в которых превышает пороговое значение.

Создается гипотеза о наличии q источников тепла внутри сокращенной области исследования:

$$\begin{aligned} X_Q^* &= \left((x_{1_min}, x_{1_max}), (x_{2_min}, x_{2_max}), (x_{q_min}, x_{q_max}) \right), \\ Y_Q^* &= \left((y_{1_min}, y_{1_max}), (y_{2_min}, y_{2_max}), (y_{q_min}, y_{q_max}) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

имеющих следующие значения температур:

$$T_Q = \begin{pmatrix} T_{(x_{1_min}, y_{1_min})}, \dots, T_{(x_{1_max}, y_{1_max})}, \\ \dots \\ T_{(x_{q_min}, y_{q_min})}, \dots, T_{(x_{q_max}, y_{q_max})} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Производится решение обратной задачи. Формируется тепловая модель на основании предположении о количестве, местоположении и температуре источников тепла, значений c, λ, k, ρ и времени эксперимента t_{exper} . На основе сформированной модели строится вторая (смоделированная) температурная карта поверхности светодиодного модуля:

$$T_{2[m \times n]} = \begin{pmatrix} T_{2(x_1, y_1)}, T_{2(x_2, y_2)}, \dots \\ \dots \\ T_{2(x_m, y_n)} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Решается оптимизационная задача, где минимизируемой функцией является разность значений поверхностных температур: полученных в модели и с изображения тепловизора (т.е. функция ошибки):

$$\min(f) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left| T_{1(x_i, y_j)} - T_{2(x_i, y_j)} \right|. \quad (7)$$

Затем осуществляется построение новой модели с измененным местоположением и/или количеством внутренних источников тепла – для минимизации функции ошибки. Минимизация функции осуществляется итеративно, пока не будет выполнено один из критериев остановки (изменение значения функций при очередной итерации меньше заданного порогового значения, выполнено максимальное количество итераций, достигнуто минимальное значение функции (соответствует задаваемому минимальному значению)).

После завершения минимизации значения функции процесс восстановления параметров источников тепла считается завершенным.

На выходе алгоритма представляются:

- восстановленное по модели распределение температур (в том числе в виде изображения);
- местоположение и параметры источников тепла;
- значения ошибок определения местоположения и параметров источников тепла (минимальная, максимальная, средняя, среднеквадратичное отклонение (СКО)).

Кроме того, формируется карта разности исходного и смоделированного изображений (представлено в значениях температур, где наибольшие значения соответствуют наибольшей ошибке определения температуры в данной области с помощью созданной модели). Апробация алгоритма была осуществлена для задачи выявления внутренних источников тепла и их температуры из карты тепловизионного контроля светодиодных модулей с использованием модели подложки и светодиодных модулей (рисунок 12).

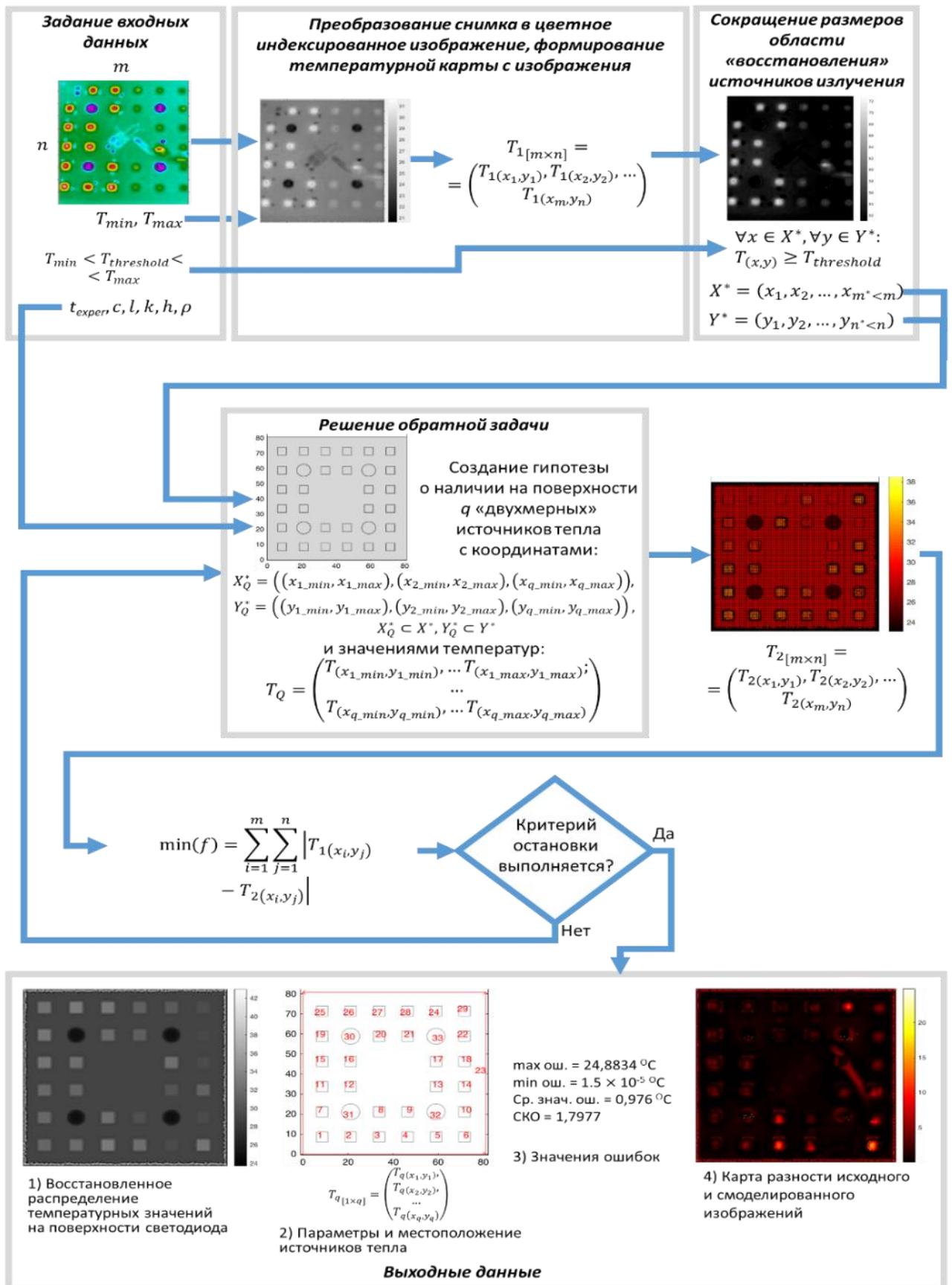


Рисунок 12 – Схема работы алгоритма восстановления параметров источников теплового излучения объекта на основе его тепловой модели и значений температурных полей (обратная задача)

При реализации алгоритма в программной среде MATLAB были использованы встроенные механизмы численного решения уравнения теплопроводности и регуляризации (регуляризация Тихонова), что повысило устойчивость результатов к шуму и неточностям исходных данных. Вычислительные характеристики алгоритма приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Вычислительные характеристики алгоритма

Время выполнения операций (секунды)	5 часа 47 минут
Количество операций (ед.)	28710063 операции (из них 28710000 операций оценок 29 функций в ГА)
Максимальная ошибка	$\pm 25^{\circ}\text{C}$
Минимальная ошибка	$\pm 1,5 \cdot 10^{-2}^{\circ}\text{C}$
Средняя ошибка	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
СКО	1,8

Основные недостатки предложенного алгоритма:

- 1) не фильтруется входное изображение (очистка подаваемых на вход данных от «шума»);
- 2) не учитывается наличие других греющихся элементов (в частности, электрических контактов питания платы светотехнического устройства и присутствующих элементов электропитания);
- 3) не учитывается возможность отсутствия нагрева светодиодных модулей при их изначальной неработоспособности.

Кроме того, в работе показано применение алгоритма при дистанционном мониторинге поверхности почвы. В частности, проведено математическое и компьютерное моделирование температурных полей, которые наглядно показывают суточные изменения температуры как на поверхности земли, так и в ее глубине. Точность выполненного расчёта подтверждается экспериментальными данными (относительная погрешность менее 10%), что доказывает адекватность использованной математической модели. Предложенный подход позволяет точно и эффективно обнаруживать, идентифицировать и управлять техногенными объектами, предотвращая их негативное воздействие на окружающую среду и инфраструктуру. Полученные результаты имеют важное применение для задач экологического мониторинга, контроля состояния трубопроводов и теплового мониторинга техногенных объектов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе представлены результаты разработки бесконтактных спектральных и тепловизионных методов контроля температуры полупроводниковых светотехнических устройств. С использованием разработанных методов контроля температуры была проведена оценка температурных полей по объёму и поверхности отдельных конструктивных элементов осветительных устройств и исследованы тепловые режимы их работы.

1. В результате исследования влияния температуры на основные электрические, фотометрические и колориметрические характеристики полупроводниковых источников света установлена температурная зависимость светового потока для полупроводникового кристалла с люминофорным покрытием.

Тепловой режим полупроводникового источника света зависит не только от температуры окружающей среды, но и от процессов выделения тепла в его активной области и выделения тепла в люминофорном покрытии. При этом температура люминофора может существенно превышать температуру кристалла.

Установлена температурная зависимость полуширины линии излучения для гетероструктуры GaInN со множественными квантовыми ямами: $\Delta E_{0,5} \approx 3 \div 4 kT$. Уширение спектра происходит в основном в сторону меньших энергий (больших длин волн).

Измеренные зависимости перепада температур кристалл-корпус источников света при постоянном токе хорошо согласуются с результатами расчетов и измерений, полученными другими методами. Согласно экспериментальным данным температурный коэффициент для светового потока составляет порядка 1 – 1,5% на каждые 10°C нагрева.

Установлено что коррелированная цветовая температура имеет сильную зависимость от рабочей температуры источника света и от времени эксплуатации. Зависимость для гетероструктуры GaInN имеет прямолинейный характер. Увеличение рабочей температуры источника света приводит к увеличению цветовой температуры, что связано с уменьшением квантовой эффективности полупроводникового материала и люминофорного покрытия. Причем данное увеличение в большей мере проявляется для источников «холодного» света.

2. Разработана методика расчета температуры р-п-перехода светодиодов в светотехнических устройствах для определения режимов их работы с учётом значений температурных полей устройств. Методика не требует построения сложной модели р-п-перехода светодиода и позволяет быстро, не теряя точности, оценивать температуру р-п-перехода для оценки эффективности теплоотвода и оптимизации конструкции светотехнических устройств.

Создана математическая модель пространственного распределения температурного поля полупроводникового источника света на основе установленных зависимостей колориметрических (спектральных) характеристик от термодинамической температуры корпуса.

3. Проведены тепловизионные измерения нескольких типов полупроводниковых источников света, а также «драйверов» питания к ним. Установлено, что тепловая мощность и тепловой режим «драйверов» оказывает определяющее влияние на тепловой режим непосредственно на световой прибор. При постоянных номинальных значениях напряжения приводит к дополнительному росту температуры светового прибора на 10-15%. Достоверность тепловизионных измерений была подтверждена расчетами по стандартизированной методике и дополнительными измерениями термопарой.

С учетом уточненных данных при тепловизионных измерениях составлена модель пространственного распределения температурного поля полупроводникового источника света (обратная задача).

4. Разработанные бесконтактные методы контроля температуры были применены при исследовании иных объектов с внутренними источниками тепла и позволили построить детализированные распределения температурных полей на поверхности объектов с внутренними источниками тепла в условиях дистанционного мониторинга.

Таким образом, выполненная работа позволила решить научно-техническую задачу, имеющую важное хозяйственное значение в исследовании и разработке новых методов и процессов, которые могут быть положены в основу создания оптических и оптико-электронных приборов, систем и комплексов различного назначения с улучшенным тепловым режимом работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК:

1 **Романова М.А.** Исследование тепловых режимов светодиодных источников света // Известия Алтайского государственного университета. 2024 № 1 (135). С. 50–55. – DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-06.

2 Жидик Ю.С., Гарипов И.Ф., Карпов С.Р., **Романова М.А.**, Троян П.Е. Разработка полупроводникового источника белого света с высоким индексом цветопередачи // Прикладная физика. – 2024. – № 6. – С. 81–88. – DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-81-88.

3 Короткова К.В., **Романова М.А.**, Смирнов С.В. Температурная и временная стабильность колориметрических параметров полупроводниковых источников света //

Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20. №1. С. 38-41. – DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-38-41.

4 Лукаш В.С., **Романова М.А.**, Смирнов С.В. Тепловой режим приборных светодиодных ламп ЛПМ 26 // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2016. Т. 19. №1. С. 111-113. – DOI: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-111-113.

5 Гончарова Ю.С., **Романова М.А.**, Смирнов С.В. Спектральный метод бесконтактного измерения температуры кристаллов полупроводниковых источников света // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. №2(36). С. 38-40.

Публикации, индексируемые базами данных Scopus и Web of Science:

6 P. Trefilov, M. Mamchenko, **M. Romanova**, I. Ischuk. Improving Methods of Objects Detection Using Infrared Sensors Onboard the UAV / Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Singapore: Springer, 2020. Vol. 187. pp. 105-114. – DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_8.

7 **M. Romanova**, P. Trefilov, I. Ischuk, A. Shevchenko, A. Iskhakov, M. Mamchenko, A. Dolgov Simulation of Thermal Fields in an Anisotropic Alternating Saturated Porous Medium for Environmental Monitoring Tasks Using UAV / Proceedings of the 12th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). M.: IEEE, 2019. pp. 1-3. – DOI: 10.1109/MLSD.2019.8911103..

8 M.V. Mamchenko, **M.A. Romanova**. Approach to Remote Control and Detection of Degradation of LEDs in IoT Devices / Proceedings of the 15th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). Moscow: IEEE, 2022. pp. 1-5. – DOI: 10.1109/MLSD55143.2022.9934462.

Публикации в других журналах, сборниках научных трудов и материалах научных и научно-практических конференций:

1 Замараева Т.Ю., **Романова М.А.**, Дохтуров В.В. Временная стабильность параметров фито-модулей CoB Citizen / Материалы 16-й Международной научно-практической конференции "Научный форум: технические и физико-математические науки" (Москва, 2018). М.: МЦНО, 2018. №6 (16). С. 79-84.

2 **Романова М.А.** Управление электрическими и тепловыми режимами полупроводниковых источников света / Труды 13-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XIII, Москва, 2019). М.: ИПУ РАН, 2019. С. 2791-2795.

3 **Романова М.А.**, Трефилов П.М., Шевченко А.В., Исхакова А.О., Мамченко М.В., Ищук И.Н., Долгов А.А. Мониторинг экологической обстановки окружающей среды с применением БПЛА / Материалы 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019, Москва). М.: ИПУ РАН, 2019. С. 1072-1074.

4 **Романова М.А.**, Замараева Т.Ю. Тепловизионный контроль температуры источников питания светодиодных фито-модулей / Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ 23–29 ноября 2020 года. Фундаментальная и прикладная физика. — Москва : МФТИ, 2020. С. 473-474.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. Св. о государственной рег. Программы для ЭВМ № 2024668559 РФ; Зарегистрировано 07.08.2024 г. «Модуль расчета и визуализации карты распределения температурного поля технического объекта с внутренними источниками тепла».