

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем
управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН)
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники» (ТУСУР)

На правах рукописи



Романова Мария Андреевна

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

2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Смирнов С.В.

Москва – Томск, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление	2
Введение	6
1 КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ СОВРЕМЕННЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА	14
1.1 Полупроводниковые источники белого света	15
1.1.1 Строение светодиодного кристалла полупроводникового источника белого света.....	15
1.1.2 Методы получения белого света с использованием полупроводниковых источников	19
1.2 Обеспечение теплового режима светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников белого света	21
1.2.1 Особенности теплопередачи в светотехнических устройствах на основе полупроводниковых источников белого света.....	21
1.2.2 Конструктивные решения для отведения тепла в светотехнических устройствах	25
1.3 Методы контроля температурных полей полупроводниковых источников света и осветительных устройств на их основе	30
1.3.1 Классификация методов контроля температурных полей.....	30
1.3.2 Сравнительный анализ методов контроля температурных полей твердых тел	32
1.3.3 Основные косвенные методы контроля температуры в полупроводниковых источниках света и в устройства на их основе	35
1.4 Методы и алгоритмы расчета температурных полей объектов с внутренними источниками тепла	41
1.4.1 Общее дифференциальное уравнение теплопроводности и граничные условия	43

1.4.2	Основные методы математического моделирования температурных полей	44
1.4.3	Практическое применение методов и алгоритмов расчета температурных полей.....	50
1.5	Выводы по разделу 1	53
2	ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРИБОРЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	56
2.1	Исследуемые осветительные устройства на основе полупроводниковых источников света	56
2.1.1	Полупроводниковый источник света КИПД-154	56
2.1.2	Полупроводниковая лампа ЛПМ 26.....	59
2.1.3	Светодиодный модуль <i>TRN-STDL28-LX5050-1402_RoHS</i>	61
2.2	Используемые методы исследования фотометрических и колориметрических параметров полупроводниковых источников света и светотехнических устройств на их основе	63
2.2.1	Анализ спектра излучения полупроводниковых источников света ..	63
2.2.2	Определение колориметрических характеристик полупроводниковых источников света	64
2.3	Используемые методы измерения температуры и теплового сопротивления исследуемых образцов	68
2.3.1	Определение температуры полупроводникового кристалла источника света через вычисление теплового сопротивления	68
2.3.2	Бесконтактное измерение температуры активной области кристалла	70
2.3.3	Тепловизионный метод измерения поверхностного распределения температуры исследуемых объектов с помощью тепловизора	72
2.4	Выводы по разделу 2	75
3	ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ	76

3.1	Взаимосвязь температуры активной области полупроводникового источника света и полуширины спектра его излучения	76
3.2	Экспериментальная методика определения температуры кристалла полупроводникового источника света	81
3.3	Температурная зависимость колориметрических характеристик полупроводниковых источников света	84
3.4	Исследование теплового режима работы приборных светодиодных ламп ЛПМ 26	92
3.5	Исследование теплового режима работы светодиодных модулей	96
3.5.1	Расчёт температуры $p-n$ – перехода чипа полупроводникового источника света в конструкции светодиодного модуля	96
3.5.2	Экспериментальное исследование теплового режима полупроводниковых источников света в составе светодиодного модуля	100
3.5.3	Моделирование температурных полей на поверхности светодиодного модуля	105
3.6	Выводы по разделу 3	111
4	АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА И ИХ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗ КАРТЫ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	112
4.1	Восстановление распределения температур осветительного устройства	112
4.1.1	Обоснование применимости тепловизионной съемки для тепловизионного контроля объектов различного размера и площади	112
4.1.2	Формальная постановка задачи	115
4.2	Алгоритм выявления внутренних источников тепла и их температуры из карты тепловизионного контроля технических объектов с внутренними источниками тепла	117
4.2.1	Описание алгоритма	117
4.2.2	Вычислительный эксперимент	122
4.2.3	Сравнительный анализ предложенных решений для выявления внутренних источников тепла и их параметров	124

4.3	Применение разработанного алгоритма для задач экологического мониторинга.....	134
4.3.1	Адаптация разработанного алгоритма для выявления внутренних источников тепла в задачах экологического мониторинга.....	134
4.3.2	Этап 1. Выявление тепловых аномалий.....	137
4.3.3	Компьютерное моделирование распределения температурных полей поверхности	138
4.3.4	Этап 2. Классификация объектов	139
4.4	Выводы по разделу 4	141
	Основные результаты и выводы	143
	Список литературы	146
	Приложение А	166
	Приложение Б	167
	Приложение В.....	169

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые источники света на основе кристаллов нитрида галлия, его твердых растворов и люминофора, излучающие белый свет, находят широкое применение в современных осветительных системах. За последнее десятилетие достижения в области конструирования и технологии полупроводниковых источников света позволили существенно нарастить объем производства светодиодов и соответственно снизить их себестоимость.

Стабильность основных световых параметров и характеристик светотехнических устройств (световой поток, световая отдача, цветовая температура) определяется не только свойствами полупроводникового материала, но и надежностью и устойчивостью к отказам, которая определяется в значительной мере организацией отвода тепла, разводкой электрических цепей, электромагнитной совместимостью частей светильника и др. Анализ распределения температурных полей должен осуществляться по всему объёму светодиодного источника света, а не только с помощью замеров температур на поверхности устройства в нескольких точках. В связи с этим актуальным является исследование изменений значений параметров и характеристик светодиодных источников света и устройств на их основе при различных электрических и тепловых режимах эксплуатации.

Наибольшее распространение получили методы контроля распределения температуры по поверхности светотехнического устройства - термограммы (температурного мэппинга). Это особенно актуально для современных устройств большой площади и со сложной топологией контактов, где весьма вероятны локальные перегруженные по току и перегреву различные его конструктивные элементы. Выявление таких элементов и возможность определения температурных градиентов по их объёму и поверхности - важное условие оптимизации конструкции, улучшения теплового регулирования и, в конечном итоге, повышения функциональных характеристик, ресурса и надежности. При ограниченной конвекции, обусловленной герметичностью корпуса, значительное

тепловыделение внутри светодиодного модуля и люминофорного слоя может привести к неоптимальным рабочим температурам и сокращению срока службы полупроводниковых источников света. Поэтому важно обеспечивать непрерывный контроль их электрических и тепловых характеристик, а также температурных режимов элементов модулей. Такой подход способствует своевременной диагностике состояния устройств, прогнозированию возможных отказов в реальных условиях эксплуатации и оперативной замене вышедших из строя светотехнических устройств. Эффективным способом теплового мониторинга является применение современных бесконтактных методов, основанных на спектральном анализе и тепловизионных технологиях.

Целью диссертационной работы является разработка бесконтактных спектральных и тепловизионных методов контроля температуры полупроводниковых светотехнических устройств, а также оценка температурных полей по объёму и поверхности отдельных конструктивных элементов.

Для достижения сформулированной цели диссертационной работы необходимо было 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 и других элементов светотехнических устройств;

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.

Степень разработанности темы.

Современные научные исследования охватывают как разработку энергоэффективных осветительных технологий на основе полупроводниковых

источников света, так и совершенствование методов и алгоритмов измерительных приложений для контроля режимов работы полупроводниковых источников света и их компонентов в процессе эксплуатации.

Развитие полупроводниковой светотехники происходит благодаря фундаментальным работам отечественных и зарубежных ученых: Алферова Ж.И., Панкова Ж., Акасаки И., Аmano X., Накамура Ш., Шуберта Ф.Е., Тринчука Б.Ф., Юновича А.Э. и других. Основное внимание уделяется повышению надежности осветительных устройств большие успехи в этом направлении достигнуты такими компаниями как *Cree Inc.* (штат Северная Каролина, США), ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника» (г. Санкт-Петербург, Россия), АО НИИПП (г. Томск, Россия). Больших успехов, в области прогнозирования и оценки надежности достигло общество инженеров-светотехников (IES – *Illuminating Engineering Society*), разработав и опубликовав документ ТМ-21 «Метод оценки деградации светового потока на протяжении срока службы источников света на светодиодах».

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

Предмет исследования: тепловые режимы работы и распределение температурных полей по объему и поверхности полупроводникового светотехнического устройства.

Научная новизна.

1) Разработан новый бесконтактный спектральный метод измерения температуры активной области кристаллов полупроводниковых источников света находящихся в конструкции осветительных устройств.

2) Разработан оригинальный метод исследования теплового режима источников света осветительных устройств путем совместного использования термографии и спектрометрии.

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 исследования были разработаны бесконтактные методы температурного контроля кристалла, которые могут найти применение в производстве и эксплуатации полупроводниковых источников света, а также светотехнических устройств на их основе. Кроме того, созданный алгоритм автоматического 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 неисправные элементы и скрытые зоны тепловыделения.

Методология и методы исследования. В рамках диссертационного исследования сочетались экспериментальные и теоретические методы. Работа, проводимая с использованием экспериментальных методов, предусматривала вычисление основных параметров и их последующее сопоставление с результатами практических испытаний. Теоретический анализ включал создание тепловых моделей и изучение нормативных документов, справочных материалов и научных источников. Среди использованных методов: математическая статистика, методы цифровой обработки изображений и 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 заключается в самостоятельном планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных данных, формулировании выводов, а также разработке программного обеспечения. Постановка задач исследования и определение основных положений выполнены совместно с научным руководителем, доктором технических наук, профессором С.В. Смирновым. Научный руководитель также оказывал консультативное содействие и осуществлял верификацию результатов в процессе выполнения работы. Апробация и тестирование осуществлены в сотрудничестве с Ю.С. Гончаровой и К.В. Коротковой.

Достоверность научных результатов подтверждается согласованностью с теоретическими и экспериментальными данными, опубликованными в научно-технической литературе. Она 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 работы.

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.

Во введении дана оценка актуальности диссертационной работы на основе аналитического обзора, 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 первом разделе представлен обзор современной научно-технической литературы по теме диссертации. Рассмотрены вопросы обеспечения корректного теплового режима для надежной и энергоэффективной работы светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников света. Проанализированы методы контроля тепловых режимов, включая тепловизионный контроль и численные методы моделирования температурных полей. Особое внимание уделено алгоритмам построения объемного распределения температуры для выявления внутренних источников тепла. На основании проведенного обзора научно-технической литературы были сформулированы задачи исследования.

Во втором разделе представлено техническое описание исследуемых полупроводниковых источников света, методов их исследования и характеристик используемого измерительного оборудования. Описаны экспериментальные методики, направленные на изучение температурных полей и влияния тепловых режимов на технические характеристики источников света, включая анализ зависимости светового потока, спектральных характеристик и фотолюминесценции люминофора от температуры и тока.

В третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований влияния теплового режима на характеристики полупроводниковых источников света и их компонентов. Описан бесконтактный метод определения температуры активной области кристаллов, основанный на анализе спектральных характеристик. Проведен анализ зависимости светового потока и люминесценции люминофора от температуры, а также температурных градиентов в осветительных устройствах. Разработана и апробирована методика оценки температурных полей с применением тепловизионного и спектрометрического методов. Полученные результаты подтверждают значимость теплового режима для эффективности и долговечности светодиодных модулей.

Четвертый раздел посвящен разработке метода восстановления параметров источников теплового излучения на основе тепловой модели объекта и данных о температурных полях. Представлены математическая модель (прямая задача теплопроводности) и алгоритм решения обратной задачи, позволяющий

локализовать и определить параметры внутренних источников тепла. Метод апробирован на светодиодных осветительных устройствах и в задачах экологического мониторинга температурного распределения почвы. Разработанный алгоритм использует численные методы дискретизации уравнения теплопроводности и регуляризацию для повышения точности. Показана его применимость для дистанционного контроля техногенных объектов и мониторинга тепловых аномалий.

В заключении диссертационной работы обобщены ключевые итоги исследования и сформулированы основные результаты, выносимые на защиту.

1 КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ СОВРЕМЕННЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Светоизлучающие диоды (*LED – Light-Emitting Diode*) представляют собой твердотельные полупроводниковые источники света, которые излучают свет при рекомбинации электронов и дырок в гетероструктурной области. История развития полупроводниковых источников света началась в 1962 году, когда инженер компании *General Electric* Ник Холоньяк разработал первый практически применимый светодиод, излучающий красный свет. В 1971 году Жак Панков и его коллеги создали первый синий светодиод, что стало значительным прорывом в области светотехники. Однако массовое применение светодиодов в освещении стало возможным только после 1993 года, когда инженер японской компании *Nichia* Сюдзи Накамура разработал высокоэффективный синий светодиод на основе нитрида галлия (GaN). Это открытие позволило создавать белый свет путем покрытия синего кристалла люминофором, преобразующим часть синего излучения в свет других цветов, что при смешении дает белый свет с различной цветовой температурой.

Полупроводниковые источники белого света обладают длительным сроком службы, который может достигать от 25 000 до 100 000 часов, что значительно превосходит показатели традиционных источников света. Конструкция светодиода включает полупроводниковый кристалл, закрепленный на подложке из меди или алюминия, корпус с контактными выводами и оптическую систему. При протекании электрического тока через кристалл происходит излучение света, интенсивность и цвет которого зависят от используемых материалов и конструкции устройства.

Светодиоды нашли широкое применение в различных сферах благодаря своим преимуществам, таким как высокая энергоэффективность, компактность и долговечность. Они используются в бытовом и промышленном освещении, системах индикации, подсветке дисплеев, медицине и сельском хозяйстве.

Постоянное совершенствование технологий производства и материалов способствует расширению областей применения светодиодов и улучшению их характеристик.

В данном разделе представлен обзор основных элементов полупроводниковых источников белого света, их истории развития, конструкции и областей применения.

1.1 Полупроводниковые источники белого света

1.1.1 Строение светодиодного кристалла полупроводникового источника белого света

Основу полупроводникового источника белого света составляет полупроводниковый кристалл, выполненный на основе GaN, в котором происходит преобразование электрической энергии в световую синего или ультрафиолетового спектра. Типичная эпитаксиальная структура кристалла с множественными квантовыми ямами представлена на рисунке 1.1.

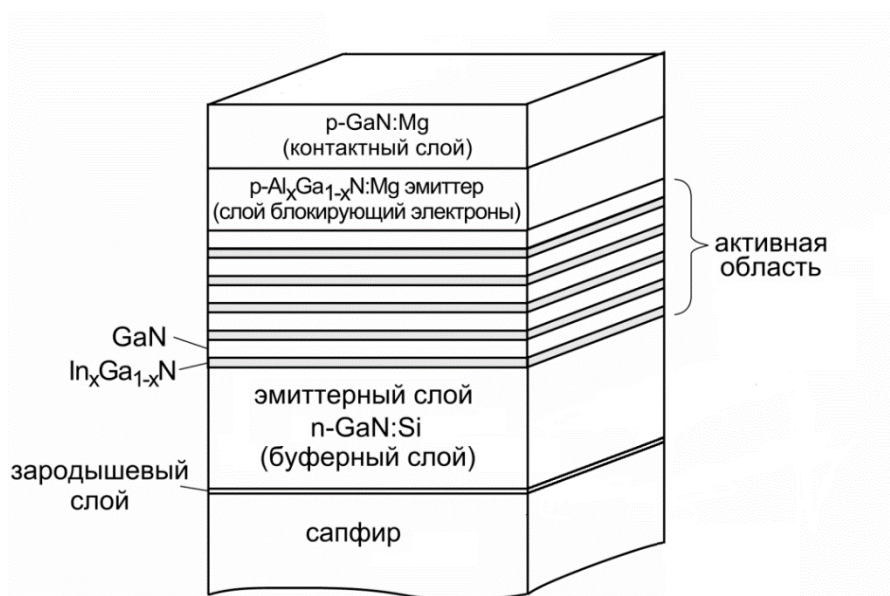


Рисунок 1.1 – Структура светодиодной гетероструктуры на основе GaN

В гетероструктурах на основе нитрида галлия-индия (*GaInN*) толщина активной рекомбинационной области может быть значительно меньше диффузионной длины носителей заряда. Рассмотрим энергетическую диаграмму такой гетероструктуры *GaInN* (рисунок 1.2), где между внешними p- и n-областями

полупроводника с более широкими запрещенными зонами E_{g2} , E_{g3} находится тонкий слой с меньшей шириной запрещенной зоны E_{g1} . Толщину этого слоя d может быть уменьшена до значений порядка сотен или даже десятков атомных слоев.

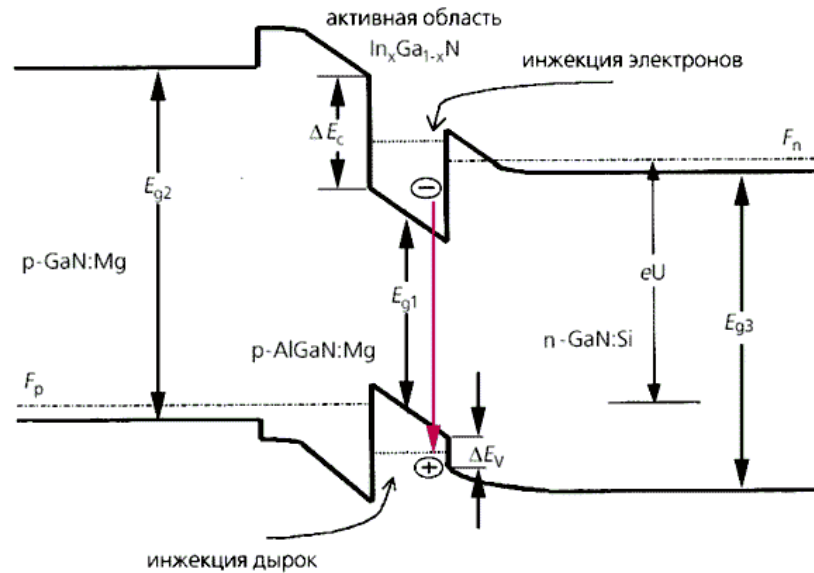


Рисунок 1.2 – Модельная энергетическая диаграмма p-n гетероструктуры с квантовой ямой в режиме прямого смещения

В гетероструктурах, помимо стандартного потенциального барьера p-n перехода, на границах слоев формируются дополнительные энергетические барьеры: ΔE_c для электронов и ΔE_v для дырок. При подаче прямого смещения создаются условия для инжекции носителей заряда в область с уменьшенной шириной запрещенной зоны. Электроны, стремясь к состояниям с минимальной энергией, заполняют нижнюю часть потенциальной ямы, тогда как дырки перемещаются к верхней границе валентной зоны, где их энергия оказывается минимальной. После попадания в узкозонный слой дальнейшее распространение носителей ограничивается потенциальными барьерами ΔE_c и ΔE_v что приводит к их локализации и последующей радиационной рекомбинации в активной области, сопровождающейся генерацией фотонов [1-4].

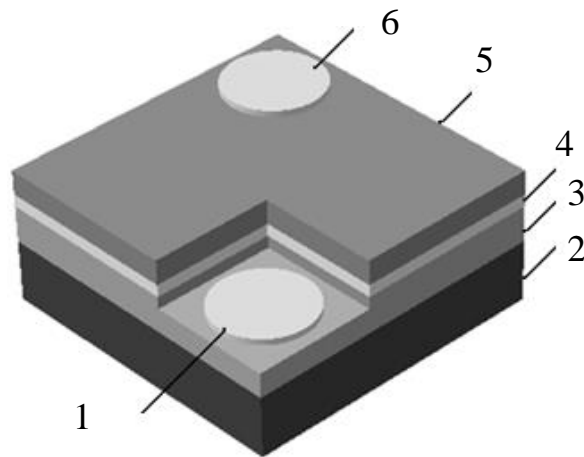
Полупроводниковые кристаллы, генерирующие излучение, подразделяются на типы в зависимости от их конструктивного исполнения [5, 6]:

– планарные структуры (оба омических контакта размещены на

поверхности, с которой осуществляется светоизлучение);

- вертикальные структуры (контакты расположены на противоположных гранях кристалла, что обеспечивает направленный отвод тока);
- кристаллы, предусмотренные для обратного монтажа по *flip-chip* технологии (омические контакты размещены на стороне, противоположной излучающей поверхности).

Структура планарного инфракрасного полупроводникового кристалла изображена на рисунке 1.3.



1 – контакт к *n*-слою; 2 – *n-AlGaAs*; 3 – *p-GaAs*; 4 – *p-AlGaAs*; 5 – *GaAs*;
6 – контакт к *p*-слою

Рисунок 1.3 – Инфракрасный полупроводниковый кристалл с планарной структурой

В структуре планарного светодиодного кристалла, электрические контакты располагаются на верхней поверхности гетероструктуры, через которую выводится излучение. Вследствие относительной простоты процесса производство планарных кристаллов распространено в большей степени чем других конструкций кристаллов. Данная технология изготовления кристаллов позволяет изготавливать маломощные светоизлучающие диоды. Низкая мощность излучения обусловлена тем, что большую площадь поверхности, через которую выводится излучение, занимают омические контакты, что приводит к отражению сгенерированного излучения, активной областью, в приконтактных слоях [6-8].

В вертикальных светодиодных кристаллах электрические контакты расположены сверху и снизу гетероструктуры [9, 10], что обеспечивает более равномерное растекание тока [8, 11] (рисунок 1.4).

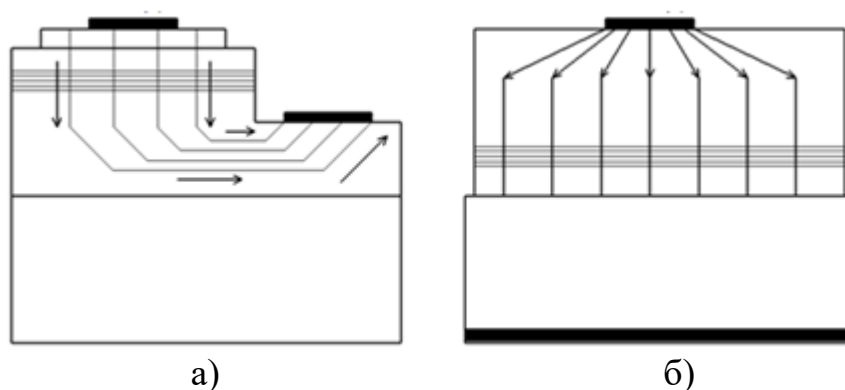


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение направления протекания тока: а) – планарная технология кристалла; б) – вертикальная технология кристалла

Кроме того, данная конструкция позволяет уменьшить количество излучения, поглощенного поверхностями контактов [12-14]. Также равномерное растекание тока позволяет задействовать в генерации излучения всю активную область. Вертикальные кристаллы обеспечивают более эффективный отвод тепла из активной области кристалла по сравнению с планарными кристаллами.

В светодиодах полупроводниковый гетероструктурный кристалл закрепляется на отражающей чашке (катод), а его верхняя часть соединяется с анодом с помощью золотой проволоки. Размер кристалла может быть до нескольких квадратных миллиметров, а диаметр корпуса варьируется от 2 мм до 10 мм, часто имея полусферическую форму. На рисунке 1.5 показаны две основных конструкции светодиодов, которые приведены ниже [15, 16].

1) Полусферический пятимиллиметровый светодиод (тип – индикаторная лампа). Свет отражается в эпоксидный корпус через коническую отражающую чашку, кристалл закреплен на катоде.

2) Диод на кристалле $GaInN$ установлен на алюминиевом или медном радиаторе для отвода тепла, герметизирован силиконовым слоем и соединен золотой проволокой с катодом.

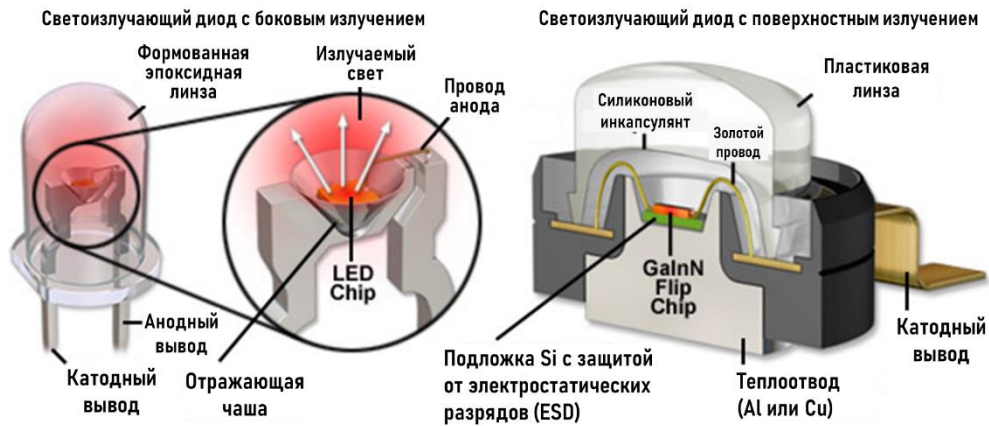


Рисунок 1.5 – Устройство светодиода малой и большой мощности [16]

Рассмотрим основные методы получения белого света с использованием полупроводниковых источников.

1.1.2 Методы получения белого света с использованием полупроводниковых источников

Поскольку светодиоды излучают узкополосный свет, для создания излучения широкого спектра применяются два основных метода [17-19]:

- использование светодиодов различных длин волн с последующим смешением их света;
- применение люминофора, который преобразует узкополосное излучение в широкополосное.

Первый подход подразумевает одновременное использование нескольких монохроматических источников видимого света, в частности, одновременное излучение (и смешение) двух, трёх и четырёх цветов (рисунок 1.6) [20, 21]. Двухцветные источники обладают максимальной световой эффективностью, но демонстрируют низкую цветопередачу. Трёхцветные системы имеют умеренные значения эффективности и удовлетворительные параметры цветопередачи ($CRI > 80$), тогда как четырёхцветные источники могут достигать индексов CRI выше 90.

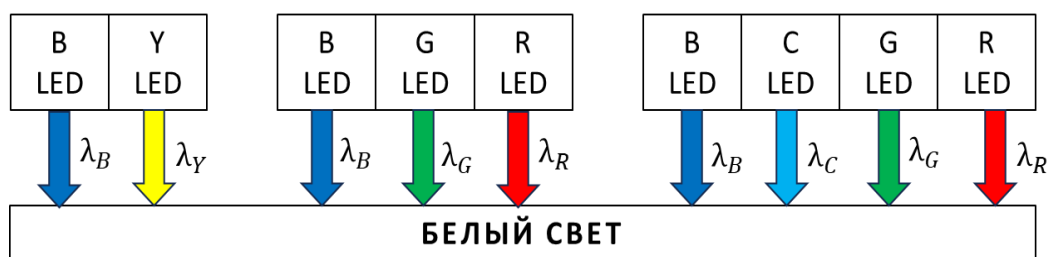


Рисунок 1.6 – Получение белого света при помощи монохроматических источников излучения

Однако наиболее распространены источники белого света на основе возбуждения светодиодами одного или нескольких люминофоров (второй подход) [22, 23]. Полупроводниковые источники света с люминофорным покрытием являются технологически более простым, экономичным и стабильным решением при создании белого света, что объясняет их широкое применение в осветительных приборах. Люминофор поглощает энергию от коротковолнового света, исходящего от полупроводникового кристалла, и переизлучает её на более длинных волнах, охватывающих разные участки видимого спектра. Для возбуждения люминофоров хорошо подходят синие светодиоды с длиной волны в диапазоне видимого спектра $\lambda_{\max} = 450\text{--}465$ нм и ультрафиолетовые светодиоды длиной волны $\lambda_{\max} = 380\text{--}410$ нм.

На рисунке 1.5 показаны принципы построения источников белого света, основанные на возбуждении люминофоров излучением полупроводниковых светодиодов. Такие устройства могут быть двух-, трех- и четырехцветными.

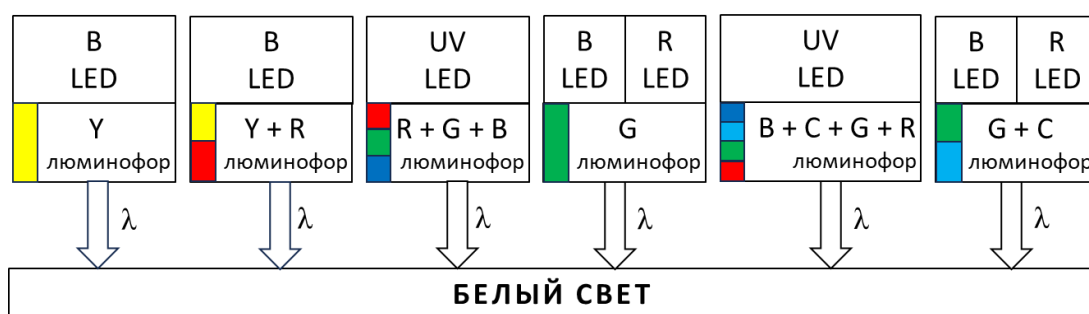


Рисунок 1.7 – Получение белого света при помощи преобразователей длины волны (люминофоров)

При получении белого света могут использоваться силикатные, нитридные и алюминатные люминофоры, легированные редкоземельными металлами:

европием и церием и др. [24]. Часто используется сочетание синего светодиода с люминофором YAG (иттрий-алюминиевый гранат, активированный церием), преобразующим часть синего излучения в более широкий спектр. Кроме того, активно развиваются люминофоры на основе оксинитридных соединений.

1.2 Обеспечение теплового режима светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников белого света

Тепловой режим полупроводниковых источников белого света, особенно повышенной мощности, имеет решающее значение в обеспечении их срока службы. Обеспечение требуемого теплового режима полупроводниковых источников белого света может достигаться как улучшением отвода тепла от кристалла, так и снижением тепловыделения на нем. Для улучшения отвода тепла производителями модернизируется как сама конструкция кристалла, так и теплоотводящие конструктивные элементы самих источников света, конструкции печатных плат для монтажа светодиодов и их упаковка на печатных платах. В настоящем подразделе описаны особенности теплопередачи в осветительных приборах на основе полупроводниковых источников белого света и основные конструктивные решения, используемые для обеспечения требуемого теплового режима.

1.2.1 Особенности теплопередачи в светотехнических устройствах на основе полупроводниковых источников белого света

Температура активной области кристалла светодиода (*p-n*-перехода) будет тем меньше, чем ниже полное термосопротивление кристалл светодиода – окружающая среда. Если нарушить тепловой режим, то *p-n*-переход может работать с температурой, близкой к максимальной, что приводит к его деградации и, как следствие, к сокращению срока службы светодиода в несколько раз [25]. На рисунке 1.14 представлена схема распространения тепла в конструкции полупроводникового источника белого света [5].

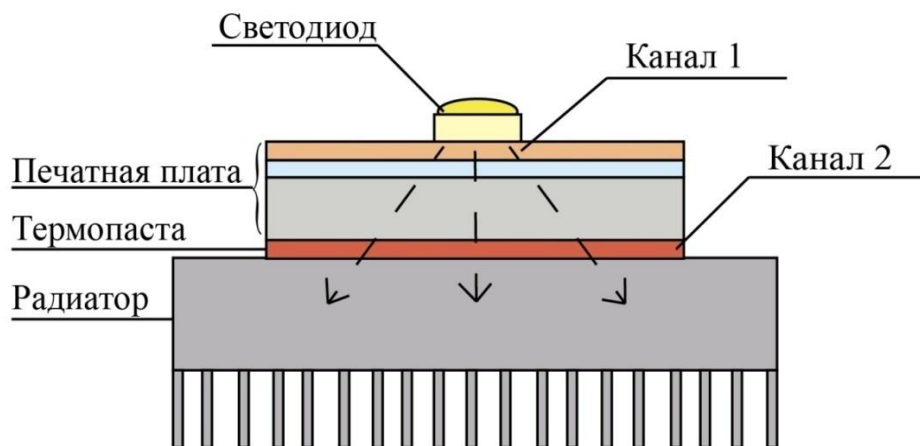


Рисунок 1.8 – Схема распространения тепла в полупроводниковом источнике белого света

В первом канале тепловая энергия от кристалла полупроводникового источника света отводится на печатную плату, что достигается путем пайки либо использованием теплопроводящих клеев и паст. [26, 27]. Во втором канале происходит передача тепла от платы с полупроводниковыми источниками света на радиатор с применением теплопроводящих паст, клеев и компаундов [28]. Если светодиоды устанавливаются непосредственно на радиатор, первый и второй каналы теплопередачи совпадают, при этом площадь лучистого и конвекционного обмена увеличивается. На рисунке 1.15 представлена схема расположения светотехнического устройства (светодиодного модуля) на радиаторе с горизонтально направленными ребрами охлаждения (рис. 1.15а) и с вертикально направленными ребрами охлаждения (рис. 1.15б). [29-32].

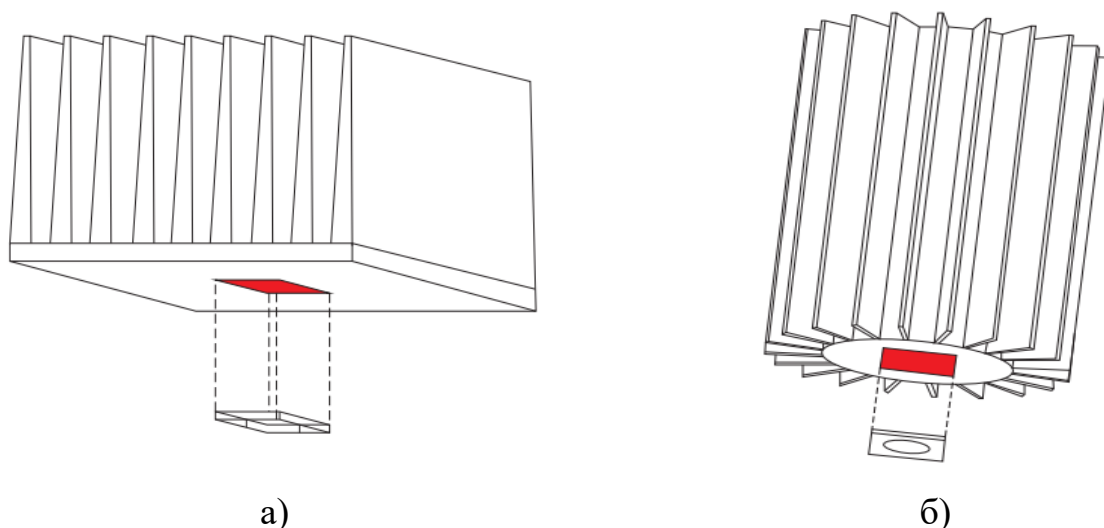


Рисунок 1.9 – Установка светодиодного модуля на корпусе-радиаторе с охлаждающими ребрами, направленными горизонтально (а) и вертикально (б)

В данных конструкциях площадь теплового контакта светодиодного модуля с радиатором эквивалентна его собственной площади, что способствует максимальной эффективности теплоотвода. Однако данный конструктивный подход предусматривает полное заполнение центральной зоны профиля алюминия, что увеличивает материалоемкость системы, приводя к росту массы и себестоимости светотехнического устройства [32].

Всем конструкциям теплоотвода на основе алюминиевого радиатора свойственна многослойность. В свою очередь, многослойной конструкции свойственны сопутствующие тепловые сопротивления переходов, которые можно минимизировать применением специальных изолирующих пластин, паст, клеев, материалов для заполнения воздушных промежутков и так далее, но так или иначе многослойность приводит к увеличению температуры перехода [33].

Основные используемые слои, входящие в конструкцию светодиодных осветительных устройств и участвующие в теплопередаче следующие [34-37].

1) Термопасты: теплопроводность пасты приблизительно $\lambda = 0,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; термопасты обладают простотой нанесения; толщина слоя не более 500 мкм.

2) Слой меди: используется в основном в силовой электронике; толщина не менее 105 мкм; обладают высоким значением коэффициента теплопроводности $\lambda = 400 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

3) Печатные платы с металлическим основанием AL PCB. В состав печатных платы с металлическим основанием AL PCB входят слои меди ($\lambda_{Cu} = 400 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), диэлектрика Al_2O_3 ($\lambda_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 25 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), алюминия ($\lambda_{Al} = 220 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$).

Применительно к устройствам на печатной плате целесообразно рассмотреть два вида теплоотвода: теплопроводность и конвекцию, которые и определяют общее тепловое сопротивление устройства.

Тепловое сопротивление печатной платы рассчитывается с учетом значений теплового сопротивления ее отдельных слоев. Для этого используется коэффициент теплового сопротивления R_{th} , который определяется по формуле [38]:

$$R_{th} = d / (\lambda \cdot A) \quad (1.1)$$

где d – толщина слоя материала (см);

A – контактная площадь (см²);

λ – теплопроводность Вт/м·К.

Чтобы посчитать общее тепловое сопротивление всей печатной платы, необходимо математически просуммировать тепловые сопротивления каждого слоя по формуле [37, 38]:

$$R_{th} = R_{th Cu} + R_{th Oxide} + R_{th Substrat} + \dots \quad (1.2)$$

Из формулы 1.1 следует, что тепловое сопротивление уменьшается с уменьшением толщины слоя материала и увеличением его теплопроводности.

Величина теплового сопротивления в значительной степени определяется процессами конвективного теплообмена на поверхности печатной платы. Интенсивность этого теплообмена характеризуется коэффициентом теплоотдачи α , значение которого можно определить на основе закона Ньютона – Рихмана. Согласно данному закону, количество тепловой энергии, передаваемой в

результате конвекции, является функцией разности температур между поверхностью тела и окружающей средой, а также коэффициента теплоотдачи, который отражает интенсивность данного процесса. Величина коэффициента теплоотдачи зависит от множества факторов, определяющих условия конвективного теплообмена, включая:

- площадью теплопередающей поверхности;
- температурой поверхности объекта;
- температурой окружающей среды.

Основная трудность в определении тепловых сопротивлений состоит в определении коэффициента теплоотдачи.

1.2.2 Конструктивные решения для отведения тепла в светотехнических устройствах

Для решения задачи обеспечения теплового режима производители полупроводниковых источников белого света используют различные конструкции.

Конструктивно они подразделяются на три группы [39].

Группа 1. Полупроводниковые источники света *DIP (Dual In-line Package)*, имеющие пулевидную форму (пример конструкции на рисунке 1.10), преимущественно применяются в крупных наружных вывесках в качестве пикселей дисплея, их основное преимущество — высокая устойчивость к внешним погодным условиям. Кроме того, они используются в качестве индикаторов в бытовой и промышленной технике. [40, 41]. Роль радиатора, отводящего тепло от кристалла, берет на себя чаша, также выполняющая функции основания, на который устанавливается диод, и отражатель, предотвращающий рассеивание света в стороны [32, 34, 37].

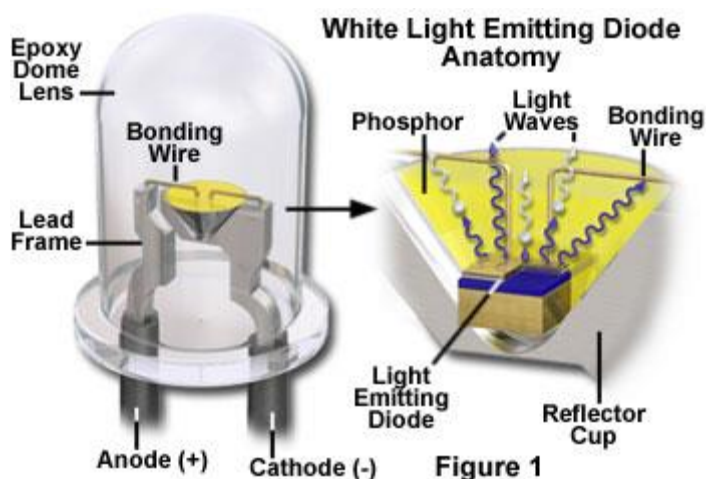


Рисунок 1.10 – Типичная конструкция светодиода малой мощности

Группа 2. Полупроводниковые источники света поверхностного монтажа (*SMD Surface-Mounted Device*) в основном используются в качестве индикаторов в малогабаритных устройствах. Преимуществом такого типа конструкции (см. рисунок 1.11) являются малые габариты, позволяющие изготавливать дисплеи с большей плотностью пикселей [42]. Отвод тепла в таких конструкциях зачастую осуществляется за счет основания, на которое припаян или приклеен кристалл [43].

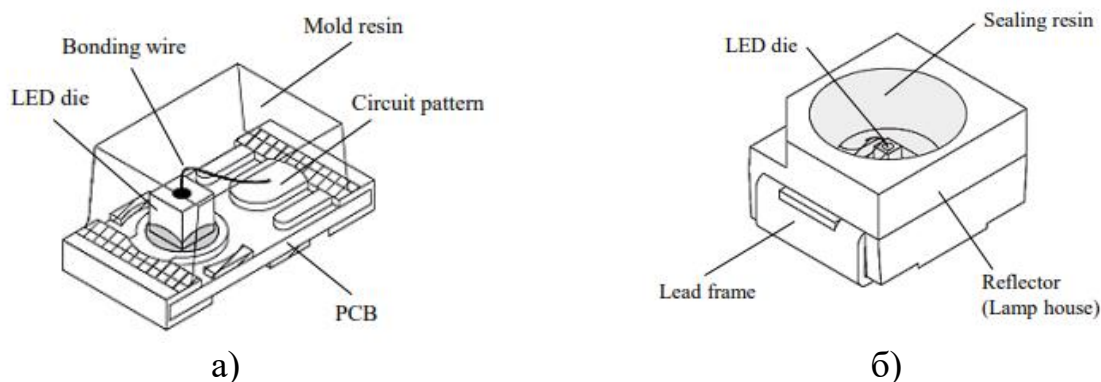


Рисунок 1.11 – Полупроводниковые источники света поверхностного монтажа:
 а) тип *PCB Printed Circuit Board*; б) тип с пластиковым или керамическим корпусированием *PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier)/CLCC (Ceramic Leaded Chip Carrier)*

Группа 3. Полупроводниковые источники света *COB (Chip-on-board)* более компактны и энергоэффективны чем полупроводниковые источники света *SMD*. Основной особенностью такой конструкции (см. рисунок 1.12) является расположение нескольких кристаллов в одном корпусе [44, 45].

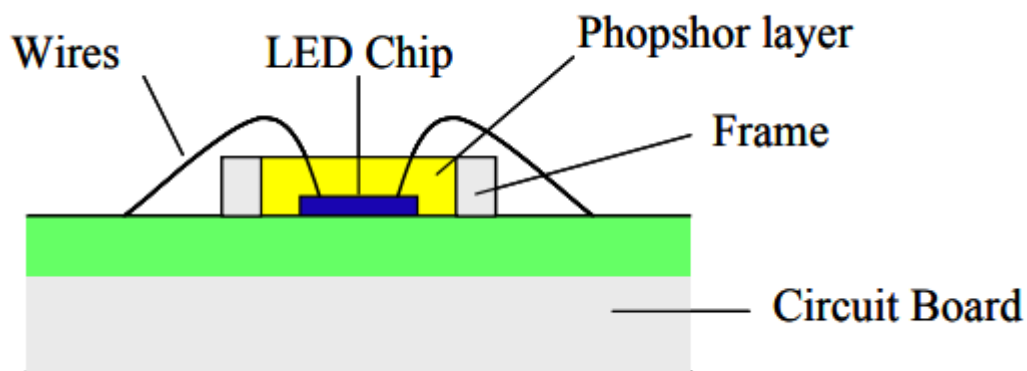


Рисунок 1.12 – Конструкция *COB* (*Chip-on-board*) полупроводникового источника света.

В настоящее время в отрасли популярны многокристальные светодиодные *COB*-модули [45], пример конструкции которой приведен на рисунке 1.13. Данный тип модулей обладает гораздо большей мощностью, чем многие однокристалльные светодиодные модули, а их преимущества заключаются в простоте конструкции и простом отводе тепла конструкция и значительно уменьшенная толщина корпуса (ультратонкий). Однако многочиповые *COB*-модули обеспечивают большую яркость и более широкую область излучения при одновременном выделении большего количества тепла [46-49].

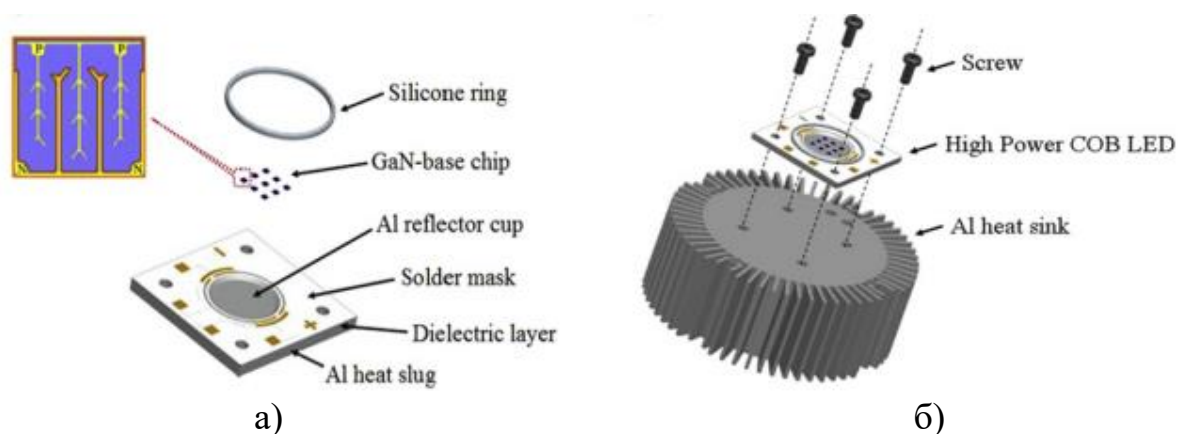


Рисунок 1.13 – Многокристальный *COB*-светодиод (а) составная структура и (б) схема светодиода в разрезе с алюминиевым радиатором

В лампах средней мощности в основном используются *PCB*-светодиоды с пластиковым корпусом. Для такого типа ламп не требуется радиатор, так как его роль выполняет сам корпус светодиода [50].

PCB-светодиоды с корпусом *PLCC* нашли широкое применение в производстве гибких светодиодных лент (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Структурная схема *PCB*-светодиода с корпусом *PLCC*

Также следует выделить *PCB*-светодиоды средней и высокой мощности с керамическим корпусом (*CLCC*) на обратной стороне которого расположена медная пластина для отвода тепла от корпуса. Сам корпус крепится на печатную плату. *PCB*-светодиоды с *CLCC* корпусом можно встретить в лампах уличного освещения и автомобильных фарах благодаря их высокой мощности. В данных изделиях роль радиатора выполняют характерные ребра на корпусе изделия (рисунок 1.15) [51].



Рисунок 1.15 – Пример конструкции светотехнического устройства с интегрированным теплоотводящим радиатором

Бытовые лампы высокой мощности изготавливаются на основе *COB*-модульных структур, которым необходим эффективный теплоотвод. В таких конструкциях радиатор является неотъемлемой частью корпуса изделия (см. рисунок 1.16). Внутри радиатора размещается драйвер, который обеспечивает питание светодиодов, преобразуя переменный ток в постоянный [52].



Рисунок 1.16 – Конструкция осветительного устройства – аналог лампы накаливания

Также существуют бытовые филаментные лампы низкой мощности (не превышающей 14 Вт) на основе *COB*-светодиодов. Их особенность конструкции заключается в корпусе светодиодного массива (см. рисунок 1.17), состоящего из тонкой стеклянной трубки или подложки из сапфира, рассеивающего тепло с кристаллов [53]. Данные лампы используются в основном в декоративных целях в силу наличия стеклянной колбы (как для ламп накаливания) и малым световым потоком вследствие малой мощности филаментной нити.

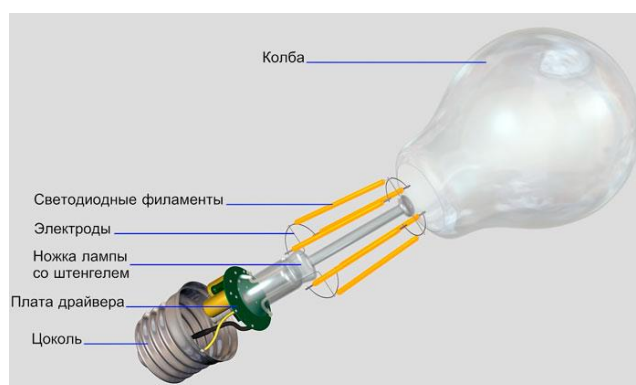


Рисунок 1.17 – Конструктивная схема светотехнического устройства на основе светодиодных филаментов

Все рассмотренные конструктивные решения, заложенные в осветительных приборах на основе полупроводниковых источников света, позволяют эффективно

обеспечивать тепловой режим работы полупроводниковых кристаллов при их эксплуатации в нормальных условиях.

1.3 Методы контроля температурных полей полупроводниковых источников света и осветительных устройств на их основе

Принцип контроля температурных полей заключается во взаимодействии теплового поля объекта с измерительными элементами, такими как термопары, фотоприёмники и жидкокристаллические индикаторы. Эти элементы преобразуют параметры теплового поля – температуру, температурный градиент, коэффициент излучения и другие – в электрические сигналы, которые затем передаются на регистрирующие устройства.

В современных осветительных устройствах на основе полупроводниковых источников света контроль температурных полей является важной задачей, влияющей на их надежность, эффективность и срок службы. Точное измерение температуры критически важно для оценки тепловых режимов работы светодиодов и сопутствующих элементов. Контроль температурных полей позволяет не только оптимизировать работу системы охлаждения, но и выявлять потенциальные дефекты, такие как перегрев кристалла, неравномерность теплоотвода и отклонения в работе р-п переходов [54]. В зависимости от требуемой точности измерения и условий эксплуатации применяются различные методы контроля температурных полей, которые классифицируются по различным признакам.

1.3.1 Классификация методов контроля температурных полей

Контроль температурных полей играет ключевую роль в обеспечении надежности и долговечности осветительных устройств на основе полупроводниковых источников света. Важным аспектом является правильный выбор метода контроля, который зависит от условий эксплуатации, требований к точности измерений и характеристик исследуемого объекта.

Согласно ГОСТ Р 56542-2019 [55], тепловой контроль является одним из основных видов неразрушающего контроля, основанного на регистрации изменений температурных полей объектов. В применении к светодиодным

источникам света он позволяет оценивать тепловые режимы работы, выявлять перегрев кристалла, неравномерность теплоотвода и отклонения в функционировании p-n переходов.

Основные классификационные признаки методов контроля температурных полей подразделяются на три группы, краткое пояснение которых приведено ниже.

1) По способу взаимодействия с объектом.

– Контактные методы – предполагают непосредственный физический контакт измерительного прибора с поверхностью объекта.

– Бесконтактные методы – осуществляют измерение температуры на расстоянии.

2) По принципу действия.

– Электрические методы – основаны на изменении электрических параметров, таких как, например, сопротивление или электродвижущая сила p-n перехода, которые зависят от температуры.

– Оптические методы – анализируют характеристики излучения объекта, в том числе в инфракрасном диапазоне.

– Механические методы – применяются реже, но могут использоваться для изучения термомеханических деформаций конструктивных элементов.

3) По характеру воздействия.

– Пассивные методы – измеряют естественное тепловое излучение светодиодов и других компонентов без дополнительного нагрева.

– Активные методы – предполагают внешнее тепловое воздействие, например, нагрев устройства для анализа его теплового отклика.

Понимание и правильный выбор методов контроля температурных полей позволяют обеспечить оптимальные условия эксплуатации светодиодных осветительных устройств, предотвратить перегрев и повысить их надежность.

1.3.2 Сравнительный анализ методов контроля температурных полей твердых тел

Различные методы термометрии обладают специфическими особенностями, что не позволяет выделить универсальный метод, для широкого круга объектов и условий измерений. В работах [56-58] предоставлена информация о различных методах измерения температуры, их применимости, преимуществах и ограничениях, а также критериях выбора подходящего метода в зависимости от конкретных условий и требований. Критерии сравнения методов контроля температурных полей выбираются, исходя из совокупности *практических, технических и нормативных* требований к измерениям.

Уточним критерии сравнения для сопоставления методов контроля температурных полей твердых тел:

- диапазон измеряемых температур – для каких температурных режимов применим метод.
- разрешающая способность – минимальное различимое температурное изменение.
- влияние окружающей среды – степень чувствительности метода к внешним факторам, таким как влажность, запыленность, уровень освещенности.
- применимость в динамических процессах – возможность измерения температуры быстроизменяющихся объектов.
- необходимость калибровки – требуется ли периодическая настройка прибора для поддержания точности измерений.

В таблице 1.1 приведены сравнительные характеристики методов контроля температурных полей, применяемых для твёрдых тел, основанные на проведённом анализе [56-60].

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики основных термометрических методов для твердых тел

Метод	Диапазон температур	Погрешность	Время отклика	Воздействие на объект	Применение
1	2	3	4	5	6
Термопарная термометрия	–200...+1700 °С (зависит от типа термопары)	±1–2 °С (типично)	Миллисекунды	Контактный метод; возможна передача тепла между объектом и датчиком	Промышленность (металлургия, печи), энергетика, двигатели, высокотемпературные процессы
Терморезистивная термометрия	–50...+200 °С	±0.1–0.5 °С	Доли секунды	Контактный метод; возможен саморазогрев датчика при протекании тока	Бытовая техника, электроника, медицина
Встроенные датчики температуры	–40...+125 °С	±1–2 °С (зависит от калибровки)	Зависит от встроенной схемы (от миллисекунд до секунд)	Требуют интеграции в конструкцию, могут влиять на габариты и дизайн	Микроэлектроника, светодиодные системы, системы управления
Инфракрасная термометрия	–50...+3000 °С (зависит от модели пирометра)	±(1–2 % от измеряемой температуры)	Миллисекунды	Бесконтактный метод; высокая чувствительность к отражающим поверхностям и коэффициенту излучения	Пирометры, быстрый контроль нагрева, медицина (ИК-измерение температуры тела и поверхностей)
Тепловизионная термометрия	Широкий (определяется моделью камеры; –20...+2000 °С)	±2–5 °С или ±2–3 %	Захват видеокадров (обычно 10–50 Гц)	Бесконтактный метод; требует учёта коэффициента эмиссии и условий окружающей среды (влаги, пыли)	Неразрушающий контроль, диагностика скрытых дефектов, экология, энергоаудит
Лазерная термометрия	От комнатной до высоких (зависит от методики)	До ±0.5–1 % (при прецизионном оборудовании)	Миллисекунды	Бесконтактный метод; возможно локальное нагревание образца лазером; требует мер безопасности при работе с излучением	Полупроводниковая промышленность, научные исследования, локальный прецизионный контроль температуры

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
Волоконно-оптические датчики	Зависит от типа оптического волокна, обычно $-40...+300^{\circ}\text{C}$	$\pm 1-2^{\circ}\text{C}$ (типично)	Секунды (распределённые системы) до миллисекунд (точечные)	Минимальное влияние; нет электромагнитных помех; требует прокладки оптоволоконного кабеля	Мониторинг больших протяжённых объектов (ЛЭП, трубопроводы), энергетика, нефтегазовая промышленность
Акустическая термометрия	Широкий (зависит от среды и скорости звука)	$\pm(1-2\%$ от измеряемой температуры)	секунды	Бесконтактное или частично контактное (через акустический стык); зависит от акустических свойств среды	Специальные промышленные процессы, агрессивные и непрозрачные среды, где другие методы затруднены
Оптическая пирометрия	От $\sim 600-700^{\circ}\text{C}$ до 3000°C (и выше)	$\pm(2-3\%$ от измеряемой температуры)	Миллисекунды	Бесконтактный метод; определение температуры по видимому излучению; требует знания излучательной способности	Металлургия, производство стекла и керамики, высокотемпературные исследования

Объединяя все эти факторы, специалисты формируют ключевые критерии для сравнения, такие как точность, диапазон, скорость отклика, воздействие на объект, стоимость и необходимость калибровки. Такой системный подход позволяет оценивать каждый метод не только с точки зрения его теоретических возможностей, но и с учетом реальных условий эксплуатации. При выборе метода контроля температурных полей важно учитывать специфические требования конкретного применения, включая температурный диапазон, необходимую точность, условия окружающей среды и возможное влияние метода на объект измерения.

1.3.3 Основные косвенные методы контроля температуры в полупроводниковых источниках света и в устройства на их основе

Для обеспечения качества и стабильности светодиодных осветительных приборов необходимо проводить комплексный метрологический контроль, который включает три ключевые области, указанные ниже.

1) Радиометрия – изучает характеристики оптического излучения, его интенсивность и спектральное распределение, а также параметры детекторов света.

2) Фотометрия – оценивает характеристики света с точки зрения восприятия человеческим глазом (яркость, световой поток, цветовая температура).

3) Спектрофотометрия – анализирует спектральные характеристики излучения, включая оптические свойства материалов, используемых в светодиодных устройствах.

Точное измерение параметров светодиодов имеет решающее значение для оптимизации их работы, повышения энергоэффективности и прогнозирования сроков службы [61, 66]. Однако их эксплуатационные параметры сильно зависят от условий работы, в частности – от температурного режима [62,64,65].

Температура р–n-перехода играет критическую роль в работе светодиодов [63]. При ее увеличении наблюдаются следующие эффекты:

- снижение светового потока (перегрев приводит к уменьшению количества излучаемого света);
- смещение спектра излучения (изменение длины волны в сторону более теплых тонов);
- снижение эффективности (часть энергии тратится на нагрев вместо генерации света);
- деградация кристалла и фосфорного покрытия (приводит к уменьшению срока службы светодиода).

Помимо этого, электрические и конструктивные факторы (ток, падение напряжения, тепловое сопротивление, материалы подложки и корпуса) взаимодействуют со спектральными и тепловыми характеристиками, образуя

сложную систему взаимосвязей [66]. На рисунке 1.18 представлена «Диаграмма взаимовлияния электрических, оптических и тепловых параметров полупроводникового источника света», наглядно демонстрирующая эти взаимосвязи. Здесь такие параметры, как T_{p-n} (температура $p-n$ -перехода), R_θ (тепловое сопротивление), I_f (прямой ток), U_f (прямое напряжение), η (эффективность), Φ (световой поток), λ_{max} и $\Delta\lambda_{0.5}$ (спектральные показатели), тесно связаны друг с другом и оказывают взаимное влияние.

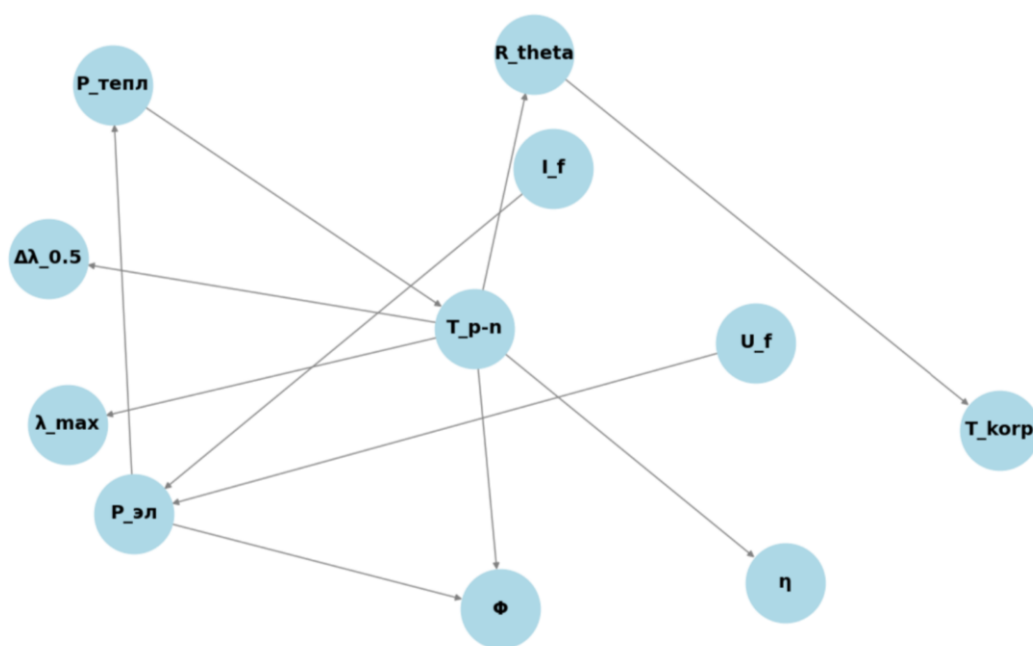


Рисунок 1.18 - Диаграмма взаимовлияния электрических, оптических и тепловых параметров полупроводникового источника света

Также исследователи [67] отмечают, что спектральное и пространственное распределение мощности излучения полупроводниковых источников света и традиционных источников существенно отличаются, поэтому традиционные методы измерения оптических характеристик их излучения приемлемы не в полной мере.

Тепловые процессы в светодиодах формируют сложную систему взаимосвязей, где каждый параметр оказывает влияние на другие. На рисунке 1.19 представлена схема, которая демонстрирует как электрические параметры, температурное воздействие и конструктивные особенности совместно определяют

тепловое состояние полупроводникового прибора.



Рисунок 1.19 – Схема взаимосвязи факторов, влияющих на тепловой режим светотехнического устройства на основе полупроводникового источника света

В текущий период действуют стандарты (см. таблицу 1.2), определяющие основные требования к проектированию, тестированию и эксплуатации светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников света.

Таблица 1.2 – Сравнительные характеристики основных термометрических методов для твердых тел

Стандарт / Документ	Область применения	Основные положения
ГОСТ Р 8.749-2011	Метрология светодиодов	Методы измерения энергетических и световых характеристик светодиодов и светодиодных модулей (световой поток, спектр, цвет, КПД).
ГОСТ ИЕС 62471-2013	Фотобиологическая безопасность	Оценка воздействия светодиодов на зрение и кожу (идентичен международному IEC 62471:2006).
ГОСТ Р 56230-2014	Эксплуатационные характеристики	Определение параметров светодиодов в условиях эксплуатации.
ГОСТ 26119-97	Энергоэффективность осветительных приборов	Требования к надежности и энергоэффективности бытовых и промышленных осветительных приборов.
ГОСТ 25359-82	Надежность радиоэлектронных изделий	Требования к надежности элементов электронной техники и устанавливает общие требования по надежности и методы испытаний этих изделий
ГОСТ Р 54350-2015	Светотехнические требования и соответствующие методы испытаний осветительных приборов	Определяет методы измерения фотометрических и электрических параметров светодиодов.
ГОСТ 55702-2020	Методы измерений электрических и световых параметров	Стандарт устанавливает методы измерения фотометрических и электрических параметров светодиодов.
ГОСТ 34819-2021	Светотехнические требования и методы испытаний	Стандарт устанавливает светотехнические требования и методы испытаний осветительных приборов.
ГОСТ 30804.4.15-2013	Электромагнитная совместимость светодиодных устройств	Требования к ЭМС осветительных систем с LED.

Несмотря на наличие стандартов, единых универсальных методик контроля и предсказания эксплуатационных параметров светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников белого света все еще не существует, что делает актуальными исследования в области термометрии светодиодов.

В работе [68] исследуется влияние тепловых процессов на характеристики светодиодов, включая стабильность цветовой температуры и интенсивности излучения. Управление температурным режимом рассматривается как критически важный фактор для поддержания их светотехнических параметров на высоком уровне. Таким образом, контроль температуры $p-n$ -перехода – ключевая задача метрологии светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников света. Это требует применения методов измерения температуры, которые позволят учитывать не только локальный нагрев кристалла, но и его влияние на электрические и оптические характеристики.

Контроль температурного режима светодиодных модулей критически важен как для производителей, так и для их пользователей, так как он напрямую влияет на эффективность, надежность и безопасность работы устройств. Если для производителей основным приоритетом является соблюдение нормативов и обеспечение стабильности работы светодиодов даже при экстремальных условиях эксплуатации, то для пользователей ключевой задачей становится увеличение срока службы и снижение эксплуатационных затрат за счет минимизации рисков перегрева и неисправностей. При правильно подобранном режиме теплового управления позволит одновременно удовлетворить требования производителей и потребителей, обеспечивая надежность и долговечность светодиодных модулей. Однако задача непрерывного мониторинга электрических и тепловых характеристик элементов полупроводниковых источников света для отслеживания их состояния и прогнозирования времени наработки на отказ в реальных условиях, и оперативного выявления и замены неисправных осветительных приборов [69].

Основой для анализа системы служит определение связи между электрическими параметрами и излучаемым светом светодиода. Тепловой анализ направлен на определение диапазона тока, при котором достигается оптимальная

светоотдача и долговечность устройства с учетом тепловых характеристик и эффективности радиатора. В исследовательской работе [70] установлено, что при достижении температуры около 80°C активной области интенсивность излучения снизится на 15% в сравнении с интенсивностью при комнатной температуре, а уже при температуре в 150°C – на 40%. Данные изменения связаны с отрицательным температурным коэффициентом прямого напряжения. Обычно этот коэффициент имеет значение в диапазоне от -3 до -6 мВ/К, а прямое напряжение светодиода составляет примерно 3,3 В при температуре $+25^{\circ}\text{C}$ и не более 3 В при температуре $+75^{\circ}\text{C}$. Таким образом, дополнительный перегрев и сокращение срока эксплуатации светодиодного модуля может возникать также в случае несоответствия режимов управления электропитанием в драйвере светодиодов [71].

Повышение температуры активной области структуры диода и как следствие, температуры всего кристалла. На сегодняшний момент не существует методики определения этой температуры, которая отвечала бы всем современным требованиям.

Описаны прямые методы измерения температуры через контактные индикаторы или оптические свойства: например, использование термоиндикаторов (жидкокристаллических плёнок), меняющих цвет в зависимости от температуры, или прямое наблюдение собственного излучения объекта [72]. Такие методы позволяют измерять температуру непосредственно на объекте контроля без сложной электроники, хотя их точность и разрешение могут уступать цифровой термографии. Косвенные методы диагностики тоже изложены в данной работе [72] говорится о способах определения температуры через изменения электрических параметров прибора. Типичный пример – измерение падения напряжения на р-п переходе или изменения скорости переключения транзистора, что коррелирует с его температурой. Также рассматриваются дифференциальные методы анализа тепловых процессов, такие как тепловая релаксационная спектроскопия для многослойных систем. Эти методы изучают отклик структуры на заданное тепловое возмущение (например, импульс нагрева) и по динамике остывания

делают выводы о наличии тепловых сопротивлений, внутренних дефектов или неоднородностей.

Методы определения температуры активной области кристалла основаны на анализе следующих характеристик и параметров:

1) Электрические характеристики р-п-перехода, включая:

- Изменение прямого падения напряжения (U_f) с температурой.
- Динамическое сопротивление р-п-перехода.

2) Спектральный анализ люминесценции, основанный на:

– Коротковолновом спаде – при изменении температуры наблюдается сдвиг интенсивности коротковолнового излучения.

– Температурном смещении максимума спектра (λ_{\max}) – при нагреве светодиода спектр сдвигается в длинноволновую область.

– Рамановская (комбинационная) спектроскопия – анализ изменения частот фононных колебаний кристаллической решетки в зависимости от температуры.

3) Инфракрасные методы (ИК-термография и тепловизионная микроскопия), позволяющие:

- Оценивать распределение температурных полей на поверхности чипа.
- Выявлять локальные зоны перегрева.

Бесконтактные методы, в частности инфракрасная термография, всё чаще рассматриваются как основной способ диагностики перегрева и скрытых дефектов, поскольку предоставляют детальную картину распределения температуры без нарушения работы системы. В исследовании [73] подробно описываются базовые принципы метода, включая активную термографию и *Lock-in*-термографию, которые подходят для обнаружения скрытых тепловых аномалий с высоким разрешением. Разработка специальных алгоритмов обработки термографических данных усиливает эту возможность, позволяя анализировать сложные температурные градиенты и обнаруживать аномалии, связанные с внутренними дефектами. Так в работе [74] показано что можно установить

взаимосвязь между мощностью элементов и колебаниями температуры на ИК-изображениях. В том числе в работе [75] представлен подход к мониторингу теплового состояния светодиодных систем в условиях эксплуатации. Использование инфракрасной термографии позволяет выявлять тепловые аномалии, которые могут указывать на неисправности или отклонения в работе устройств. Этот подход закладывает основу для разработки надежных систем диагностики и профилактики отказов. Авторы в работе [76] рассматривают методы управления тепловыми процессами в светодиодах. С использованием инфракрасной термографии показано, как оптимизация теплоотводящих систем снижает риск перегрева, повышает эффективность и продлевает срок службы устройств. Методы, предложенные в этой работе, имеют практическую ценность для проектирования высокомоощных светодиодов. Публикация [77] дополняет анализ, демонстрируя применение инфракрасной диагностики для локализации зон перегрева в светодиодных модулях. Такая диагностика позволяет не только обнаруживать проблемные области, но и предотвращать деградацию и выход из строя устройств.

1.4 Методы и алгоритмы расчета температурных полей объектов с внутренними источниками тепла

Исследование тепловых процессов в объектах с внутренними источниками тепла требует комплексного подхода, включающего всесторонний анализ распределения температурных полей как во всем объеме объекта, так и в его отдельных структурных элементах. Под внутренним источником тепла будем понимать элемент объекта, в котором происходит генерация тепловой энергии вследствие преобразования электрической энергии в тепловую. Наличие таких источников приводит к неравномерному распределению температуры внутри объекта, что требует применения специальных методов анализа тепловых режимов. Полупроводниковые источники света характеризуются значительным внутренним тепловыделением, обусловленным их конструктивными особенностями, детально рассмотренными в подразделе 1.1. В частности, в $p-n$ -переходе

полупроводникового источника света при протекании электрического тока тепло генерируется непосредственно внутри кристалла. В современных светодиодных структурах 70–90% подводимой электрической мощности преобразуется в тепло в объеме кристалла [78], что приводит к образованию значительных температурных градиентов. С учетом этого исследования температурных полей значительно возрастает в контексте современных инженерных задач, включая разработку светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников света. В этих системах значительная часть потребляемой энергии преобразуется в тепло внутри компонентов, что существенно влияет на температурный режим и общую эффективность работы устройства. Поэтому корректное моделирование и расчет температурных полей являются ключевыми этапами проектирования светотехнических устройств (светодиодные модули), поскольку тепловой режим оказывает значительное влияние на их надежность, эффективность и эксплуатационный ресурс. Этот вывод подтверждается анализом, представленным в подразделах 1.2 и 1.3, где продемонстрирована зависимость эксплуатационных параметров от температурного режима.

Для точного расчёта температурных полей объектов с внутренними источниками тепла применяются математические модели процесса теплопроводности, учитывающие объёмное тепловыделение. При формировании таких моделей важно учитывать: законы теплопроводности (уравнение Фурье–Кирхгофа), геометрические параметры объектов, теплофизические свойства материалов объектов, граничные условия (математические условия, описывающие физические процессы на границах областей) и начальные условия. В зависимости от исходных данных и искомых величин задачи теплового анализа подразделяются на прямые и обратные. Ниже приведено краткое пояснение их отличительных особенностей

В прямой задаче, при известных теплофизических свойствах материала, источниках тепла и граничных условиях, требуется определить распределение температуры (температурное поле) в объекте [79]. Решение уравнения теплопроводности сводится к нахождению функции $T(r, t)$ во всем объеме.

Обратная задача заключается в определении по измеряемым температурам или тепловым потокам на границах восстановить распределение внутренних источников тепла или теплофизические характеристики материала [79]. Обратные задачи теплопроводности, как правило, некорректно поставлены (чувствительны к возмущениям исходных данных) и требуют специальных методов регуляризации решения.

1.4.1 Общее дифференциальное уравнение теплопроводности и граничные условия

Полное уравнение теплопроводности (нестационарный случай) описано уравнением теплопроводности Фурье-Кирхгофа [80]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + Q \quad (1.X)$$

где

ρ — плотность материала,

c_p — удельная теплоемкость,

k — коэффициент теплопроводности,

Q — объёмный источник тепла.

Данное уравнение учитывает временные изменения температуры и внутренние источники тепла, т.е. $Q \neq 0$

Если же наблюдается процесс стационарный ($\partial T / \partial t = 0$) и нет внутренних источников тепла ($Q=0$), то уравнение Фурье превращается в уравнение Лапласа:

$$\nabla^2 T = 0$$

где ∇^2 — оператор Лапласа (вторые частные производные по пространственным координатам), а T — температура.

Для замкнутости задачи задаются краевые условия на границах области (граничные условия) и начальные условия во времени.

В зависимости от физической постановки задачи различают три вида граничных условий [80]:

I рода (Дирихле) - поддержание температуры постоянной на границе:

$$T|_{\Gamma_T} = T_0 \quad (1.X)$$

II рода (Неймана) – задан тепловой поток через границу:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_h} = q_0, \quad (1.X)$$

III рода (Ньютоновское охлаждение) – задано условие конвективного теплообмена с окружающей средой:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_h} = \alpha(T - T_{\text{окр}}), \quad (1.X)$$

где

α – коэффициент теплопередачи;

$T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

Для многослойных объектов на внутренних границах раздела материалов накладываются условия сопряжения: равенство температур на контакте и равенство тепловых потоков.

В зависимости от сложности модели и доступных данных применяются различные методы решения задачи теплопроводности (формула 1.X). Ниже рассмотрены основные подходы, их принципы, преимущества и недостатки.

1.4.2 Основные методы математического моделирования температурных полей

В работах [81-88] рассмотрены фундаментальные процессы теплопередачи и подходы к их математическому описанию. На основании анализа представленных источников информации представлены методы моделирования температурных

полей, позволяющие прогнозировать распределение тепла в различных средах и учитывать влияние граничных условий, физических свойств материалов и внутренних источников тепла.

Аналитические методы.

Аналитическое решение уравнения теплопроводности возможно лишь для относительно простых областей и условий, когда уравнение поддается математическому интегрированию. Точные решения получают, как правило, для идеализированных моделей (однородный стержень, бесконечная пластина, сферический слой и т.п.) с помощью методов разделения переменных, интегральных преобразований (преобразование Фурье, Лапласа) и др. *Приближенные аналитические решения* (например, метод малого параметра, асимптотические разложения, метод теплоёмкостей) используются, когда точное решение в замкнутом виде недостижимо, и позволяют получить формулы для оценки температуры с определенной погрешностью. Возможны также *эвристические методы* – специальные приёмы и упрощения, основанные на инженерном опыте, позволяющие найти практически приемлемое решение в случаях, где строгий анализ затруднен. Однако в целом применение чисто аналитических методов к многослойным структурам с внутренними источниками тепла ограничено. Полученные формулы зачастую справедливы лишь при частных допущениях и не дают универсального решения в удобной для практики форме.

Поэтому для сложных устройств аналитический подход обычно дополняют или заменяют численным.

Численные методы.

Численное моделирование основано на приближённом решении дифференциальных уравнений с помощью вычислительных алгоритмов. Наибольшее распространение получили *метод конечных разностей (МКР)* и *метод конечных элементов (МКЭ)*. Суть численных методов – это замена непрерывной задачи дискретной: область разбивается на сеть узлов или элементов, а дифференциальное уравнение заменяется системой алгебраических уравнений.

Метод конечных разностей. При МКР область расчетов покрывается регулярной сеткой узлов; частные производные в уравнении теплопроводности аппроксимируются разностными отношениями. В результате дифференциальное уравнение:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q, \quad (1.X)$$

где

$\frac{\partial T}{\partial t}$ – локальная производная температуры по времени (описывает нестационарный процесс),

$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ – вторая производная температуры по пространственной координате,

преобразуется в разностное уравнение:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \alpha(T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n) + \frac{\Delta t}{\rho c} q_i^n \quad (1.X)$$

где

T_i^n – температура в i -м узле на n -м шаге по времени,

Δt – шаг по времени,

α – число Фурье, определяемое выражением: $\frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2}$,

Δx – шаг сетки по координате.

q_i^n – объемная плотность тепла внутреннего источника.

Полученная система алгебраических уравнений (при неявной схеме – система линейных уравнений для T_i^{n+1} решается итерационно на каждом шаге по времени. Метод конечных разностей относительно прост в реализации и эффективен для задач с несложной геометрией области. Его недостатком является трудность применения на сложной форме областях – требуется вычислять сетки в криволинейных координатах или использовать адаптивное локальное измельчение сетки в зонах сложной формы.

Метод конечных элементов. МКЭ представляет собой более универсальный численный метод, особенно удобный для областей сложной формы и неоднородных материалов. Область разбивается на совокупность конечных элементов (треугольников, прямоугольников, тетраэдров и т.д.), по узловым точкам которых приблизительно рассчитывается искомая температура. Для каждого элемента формулируются уравнения теплового баланса (локальные уравнения теплопроводности). Решение внутри каждого элемента представляется в виде интерполяции по формам (функциям) элемента, а вклад внутренних источников и граничных условий учитывается в векторе правой части.

Итоговая глобальная система имеет вид:

$$[K]T = F \quad (1.X)$$

где

$[K]$ – матрица коэффициентов (теплопроводности) размерностью $N \times N$ (здесь N – число узлов сети),

T – вектор неизвестных узловых температур,

F – вектор тепловых нагрузок (за счет внутренних генерируемых тепловых потоков и граничных воздействий).

Элементы матрицы жесткости $[K]$ вычисляются путем интегрирования по объему элемента (или по площади, в 2D) и включают материалы свойства элемента.

Преимущества МКЭ – высокая геометрическая гибкость (сетка произвольной конфигурации, элементы разного размера и формы) и возможность учесть индивидуальные свойства каждого элемента, в том числе анизотропию материалов. Повышение точности достигается локальным уменьшением размера элементов в критических областях (адаптивное измельчение сетки), ограниченное лишь вычислительными ресурсами. Из недостатков МКЭ – более сложная реализация по сравнению с МКР и необходимость генерации качественной сетки; при грубой сетке возможны локальные ошибки (например, отрицательные температуры), требующие сгущения разбиения.

Имитационные и статистические методы.

В случаях, когда детерминированное решение затруднено из-за сложной геометрии или физических процессов, прибегают к имитационному моделированию. Его суть – воспроизвести работу системы в вычислительной среде, шаг за шагом имитируя процессы теплопередачи и генерируя статистические данные о ее поведении. Одним из мощных инструментов здесь является *метод статистических испытаний (Метод Монте-Карло)*. Он основан на многократном случайном моделировании процесса теплопереноса с тем расчетом, чтобы частотно-вероятностные характеристики случайного процесса соответствовали решаемой задаче. Достоинство метода Монте-Карло – его универсальность и применимость к системам любой сложности. Кроме того, имитационная модель позволяет исследовать поведение системы при различных наборах случайных факторов и оценивать чувствительность решения к разбросу параметров. Однако недостатками являются высокая трудоемкость вычислений и получение решения в виде статистических оценок, а не явных зависимостей. Для повышения надежности результатов требуется большое число испытаний, что увеличивает затраты машинного времени. Тем не менее, статистическое моделирование незаменимо, когда аналитические и стандартные численные методы неприменимы или дают неопределенный результат.

Графические (экспериментальные) методы.

Данный метод основан на использовании экспериментально полученных тепловых характеристик объекта для последующих расчетов. Например, метод графо-аналитического расчета температурного поля может опираться на экспериментально измеренную *переходную тепловую характеристику* прибора – зависимость теплового сопротивления или избыточной температуры от времени при ступенчатом тепловом воздействии. В промышленной практике для полупроводниковых приборов часто приводятся графики переходного теплового сопротивления р–п-перехода (отражающие нагрев кристалла во времени). Используя такие графики и известные электрические эквивалентные схемы тепловых цепей, можно методом наложения (свертки) прогнозировать

температурный режим при произвольном воздействии. Преимущество экспериментально-графического метода – он непосредственно опирается на реальные данные, минуя сложные дифференциальные расчеты на первом этапе. Однако дальнейшее использование графической информации в расчетах затруднено: как правило, оно сводится к графо-аналитическим приёмам, обладающим невысокой точностью и требующим ручной обработки. Кроме того, для каждого нового объекта необходимо проводить экспериментальные измерения, что делает метод трудоемким. Таким образом, графический метод чаще применяется для верификации и калибровки других моделей, а не для самостоятельного прогноза температурного поля.

Метод поэтапного моделирования.

Сложные технические объекты такие как светотехнические устройства на основе полупроводниковых источников света целесообразно моделировать поэтапно. Данный подход основан на декомпозиции сложной системы на иерархически организованные подсистемы (элементы) и последовательном расчете тепловых процессов в каждой из них с последующим объединением результатов.

При моделировании теплового режима светотехнического устройства целесообразно выделять несколько этапов: расчет распределения температуры внутри кристалла (р–n-перехода), затем в корпусе и плате, далее в радиаторе и окружающей среде. На каждом этапе применяется наиболее соответствующий метод моделирования (аналитический или численный), после чего модели интегрируются посредством граничных условий теплообмена между подсистемами.

Итоговая совмещенная модель учитывает все ключевые области тепловыделения и теплоотвода, а их взаимодействие описывается граничными условиями первого, второго и третьего рода. Основное преимущество данного метода заключается в возможности анализа чрезвычайно сложных систем путем объединения отдельных моделей, каждая из которых может быть смоделирована с высокой точностью. Основные недостатки метода включают повышение вычислительной сложности, увеличение вероятности погрешностей на стыках

моделей, а также отсутствие единой формализованной процедуры построения решения. Несмотря на эти ограничения, поэтапное моделирование широко применяется в практике теплового анализа сложных приборов, поскольку позволяет объединять аналитические, численные и экспериментальные результаты в единую комплексную модель.

Математическое моделирование температурных полей, базируясь на решении уравнений теплопроводности (как линейных, так и нелинейных), неразрывно связано с применением вычислительных алгоритмов. При этом сами уравнения, описывающие процессы теплопереноса, формируют непрерывные математические задачи, тогда как их численная реализация предполагает дискретизацию области и времени (если задача нестационарная), что приводит к необходимости построения и реализации алгоритмических схем. В частности, при использовании конечно-разностных, конечно-элементных или конечно-объёмных методов каждая итерация расчёта строится на последовательном выполнении наборов операций, таких как решение систем линейных (или нелинейных) алгебраических уравнений, уточнение граничных условий и коррекция параметров. Эти операции представляют собой формализованные алгоритмы, то есть наборы чётких правил преобразования входных данных (распределение температуры на предыдущем шаге итерации, термофизические свойства среды, внешние влияния) в выходные (обновлённое распределение температур). Таким образом, именно в рамках процедур численного решения уравнений теплопроводности и заключены основные алгоритмические действия и процессы, позволяющие переходить от абстрактной математической постановки к конкретным количественным результатам моделирования.

1.4.3 Практическое применение методов и алгоритмов расчета температурных полей

В ряде научных работ рассматривается широкий спектр технических решений для расчёта температурных полей в электронных компонентах, включая как аналитические, так и численные методы. Среди аналитических приёмов

выделяют использование эквивалентных электрических схем теплового сопротивления [89], дающих быструю оценку распределения температуры между кристаллом, корпусом и радиатором. Отдельно можно выделить и применение более специфического полуэмпирического метода как «мираж-эффект» при лазерном нагреве боковых поверхностей [90], позволяющие локализовать зоны повышенного тепловыделения. Но есть и решения, позволяющие при определенных допущениях получить функцию нагрева объекта. Так в статье [91] предложен метод управления температурным полем объектов на основе функции Грина. Разработана математическая модель, позволяющая стабилизировать температурный режим с помощью импульсных источников нагрева. Представлены результаты моделирования и программной реализации, подтверждающие эффективность предложенного подхода. Однако подобные способы дают лишь общее представление распределении температур и могут помочь на ранних стадиях проектирования светодиодных (*LED*) модулей.

Наряду с этим, большое внимание уделяется трёхмерным численным методам, особенно МКЭ. В материалах [92] описан алгоритм решения так называемой обратной задачи теплопроводности: по экспериментально измеренным температурам (например, с помощью инфракрасной термографии) восстанавливается распределение внутренних источников тепла. Для обеспечения устойчивости решения применяется регуляризация Левенберга–Марквардта для стабильного определения внутренних источников тепла. Кроме того, стоит отметить отдельно применение стохастического метода Монте-Карло для моделирования переноса энергии на микроскопическом уровне. Так в работе [93], анализ теплопереноса в кремниевых наноплёнках выполнен посредством транзиентного (переходного) моделирования Монте-Карло, решающего уравнение Больцмана для фононов. Такой детальный расчёт важен для современных высокомоощных полупроводниковых приборов, в том числе светодиодов, у которых плотность тепловыделения в кристалле весьма высока.

При этом в исследовательских работах примеров пошагового вычисления и алгоритмических процедур практически не рассматриваются. Так в работах [89, 92-

97] представлены исследовательский материал преимущественно носит описательный подход, т.е. указываются данные для проведения расчета температурного распределения и формируются выводы о расхождении с экспериментальными данными.

Отдельно стоит отметить, что современные тенденции в обработке данных теплового контроля, особенно в анализе тепловизионных изображений [98-100], ориентированы на использование технологий машинного обучения. Применение нейронных сетей для автоматического обнаружения горячих точек на тепловых изображениях или классификации дефектов по их тепловому сигнатуре становится актуальным направлением мониторинга.

Также в научных публикациях подчеркивается важность взаимодополнения диагностики и расчёта при исследовании температурных полей. В частности, в исследовании [76] было показано расхождение между моделированным распределением температуры и данными, полученными с помощью ИК-камеры, что послужило обоснованием необходимости привлечения термографии для корректировки модели. Некоторые методы прямо интегрируют измерения в вычислительный процесс как. Например, в материалах статьи [92] рассматривается решение обратной задачи теплопереноса, в которой измеренные данные (температурное поле на поверхности устройства) используются в качестве входных параметров для вычислительной процедуры, восстанавливающей распределение внутренних тепловыделений. Методы регуляризации и численного решения уравнений теплопроводности в этом случае необходимы для того, чтобы устойчиво связать измеренную температуру и рассчитываемые характеристики источников тепла. Результат – модель, согласованная с экспериментом, позволяющая заглянуть внутрь устройства виртуально и определить, где и с какой интенсивностью генерируется тепло. Ещё один аспект взаимодействия моделирования и диагностики – измерение тепловых параметров для подстановки в модели. К примеру, упомянутые стандартные методы измерения теплового сопротивления [72] фактически предоставляют модельные параметры (тепловые сопротивления, теплоёмкости), которые затем используются в расчетных схемах для предсказания

температуры. В то же время, эти методы (прямые и косвенные) сами опираются на модельные представления – например, на линейную зависимость электрического параметра от температуры – то есть эксперимент интерпретируется через расчётную модель.

Таким образом, измерения (тепловизионные изображения, данные датчиков, электрические тесты) служат для валидации и калибровки математических моделей теплопереноса. В свою очередь, наличие достоверной модели позволяет лучше понять результаты диагностики, прогнозировать поведение системы в различных режимах и даже планировать, какие параметры стоит измерять.

Систематизация приведённых исследований свидетельствует об эволюции подходов к тепловому анализу электронных компонентов, в том числе и полупроводниковых источников света: от простого мониторинга состояния (например, [75]) и управления тепловым режимом [76] до высокоточной диагностики внутренних перегревов [101] и расчётного моделирования всей конструкции [102]. В том числе, серьёзное внимание уделяется вопросам оценки нагрева вторичной оптики [103] и детализации дефектов в полупроводниковых структурах [104], что подчёркивает центральную роль инфракрасных методик и численных алгоритмов в обеспечении надёжности и энергоэффективности светотехнических устройств. Благодаря их сочетанию разработчики могут не только оперативно выявлять критические зоны перегрева, но и проектировать системы теплового управления с учётом реальных температурных полей, добиваясь стабильной и длительной работы *LED*-модулей.

1.5 Выводы по разделу 1

Создание оптимального теплового режима полупроводниковых источников света в составе осветительных устройств является важнейшим условием обеспечения их высокой надёжности. Так как основным параметром, определяющим стабильность работы и ресурс осветительного прибора, выступает температура активной области кристалла полупроводникового источника света, особое внимание при проектировании устройств должно уделяться не только

выбору конструктивных решений, обеспечивающих эффективный теплоотвод, но и методам контроля поверхностных и объёмных тепловых полей в реальных условиях эксплуатации. В существующих подходах к контролю теплового режима, ориентированных преимущественно на контактные методы (термопары, терморезисторы или встроенные температурные датчики), часто недостаточно точно определяется температура непосредственно в активной зоне кристалла, поскольку датчики не всегда могут быть размещены вблизи р–n-перехода, а также могут вносить собственные погрешности. Кроме того, в традиционных бесконтактных методах, основанных на инфракрасной термометрии, трудно корректно учитывать отражающие и полупрозрачные поверхности, а также многие исследователи отмечают проблемы при восстановлении температурного поля внутри структуры только по поверхностным данным. Основным недостатком (или совокупностью недостатков) данных решений для выявления внутренних источников тепла светодиодных устройств и количественной оценки их температуры является недостаточная чувствительность к неоднородным зонам нагрева в объёме кристалла, а также невозможность полноценного определения распределения температуры без корректных алгоритмов решения обратных задач теплопроводности и учёта спектрально-зависимых оптических свойств материалов.

В связи с этим актуальными задачами полагаются разработка бесконтактных методов измерения температуры активной области кристаллов полупроводниковых источников света и исследования их тепловых режимов работы, а также создание алгоритма определения параметров источников тепла и восстановления картины распределения температуры внутри осветительного устройства. Основная идея такого подхода заключается в комплексной оценке температурных полей и реальных условий функционирования светодиодного осветительного устройства непосредственно в процессе и без необходимости сложного вмешательства (демонтаж, разборка), что позволит своевременно выявлять внутренние зоны перегрева и корректировать режимы работы для повышения надёжности и энергоэффективности.

Таким образом, сформулированы следующие задачи исследования:

- 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 и других элементов светотехнических устройств;
- 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.

2 ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРИБОРЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Исследуемые осветительные устройства на основе полупроводниковых источников света

В работе проводились исследования теплового режима работы полупроводниковых источников света в дискретном виде и в виде и составе осветительных устройств.

2.1.1 Полупроводниковый источник света КИПД-154

В качестве объекта исследования был выбран полупроводниковый источник света КИПД-154 производства АО «НИИПП» г. Томска. Однокристалльные источники света типа КИПД-154 в металлополимерном корпусе используются в светотехнических изделиях для систем освещения, контроля и сигнализации [105].

На рисунке 2.1 и 2.2 представлены внешний вид и габаритный чертеж соответственно полупроводникового источника света КИПД-154.

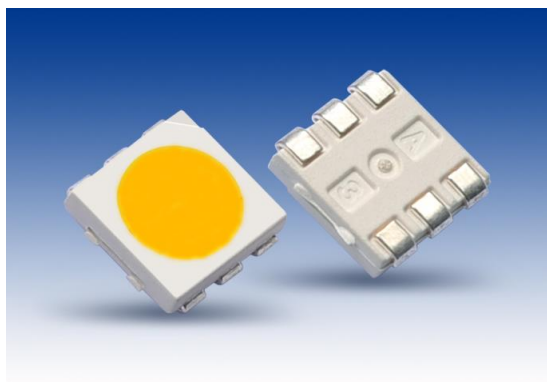


Рисунок 2.1 – Внешний вид полупроводникового источника света КИПД-154

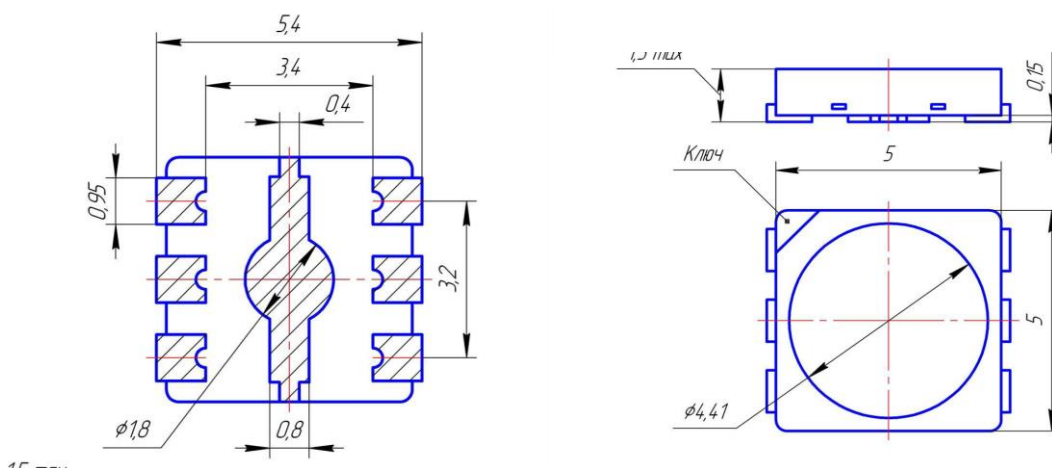


Рисунок 2.2 – Габаритный чертеж источника света КИПД 154 в корпусе типа 5050-1

Основные технические характеристики КИПД 154 представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики КИПД 154

№	Наименование характеристики/параметра	Значение характеристики/параметра
1	Максимальный ток	500 мА
2	Максимальное электрическое напряжение	5 В
3	Максимальный импульсный прямой ток при $f = 1$ кГц и $Q = 10$	700 мА
4	Максимальная рабочая температура корпуса	+85 С
5	Минимальная рабочая температура корпуса	-60 С
6	Тепловое сопротивление $p-n$ переход	30 С/Вт
7	Масса	$\leq 0,6$ г

Относительное спектральное распределение мощности излучения КИПД 154 представлено на рисунке 2.3.

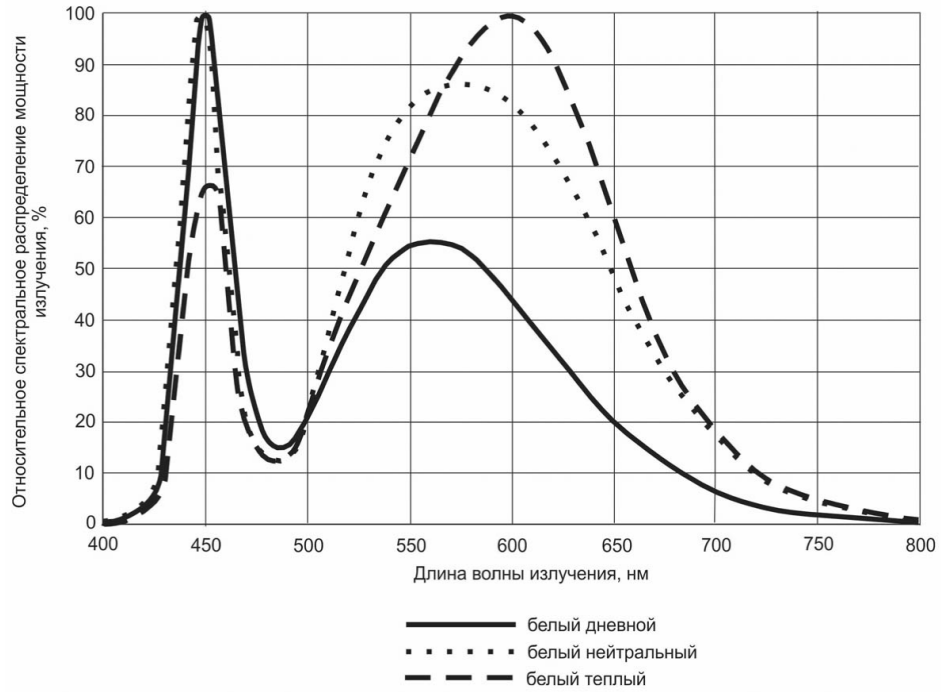


Рисунок 2.3 - Спектр излучения источника света КИПД 154

В целях проведения исследований полупроводниковых источников света КИПД 154 был размещен на алюминиевой пластине (рисунок 2.4).

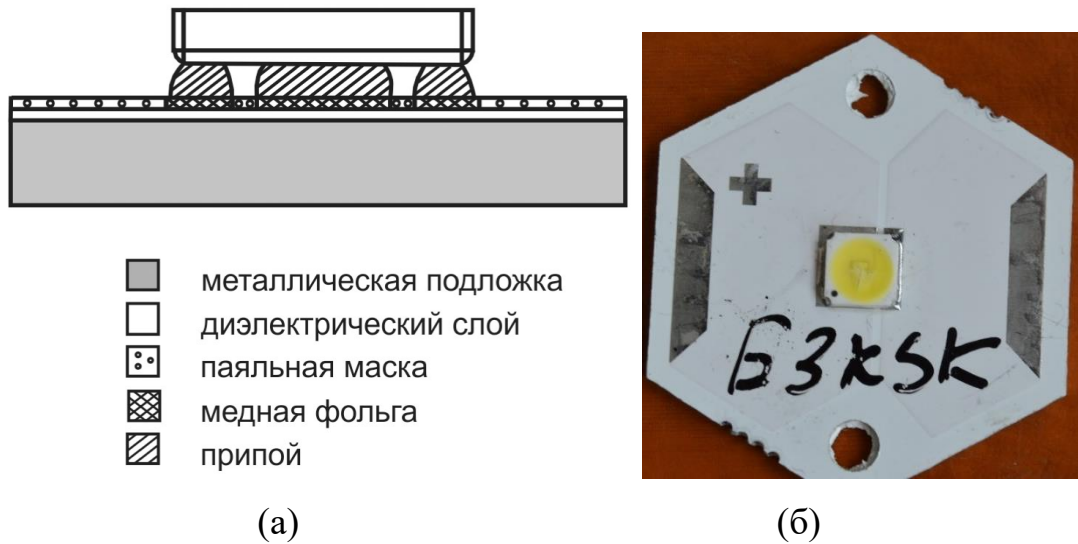


Рисунок 2.4 – КИПД-154 как объект исследования (а) способ монтажа (б) внешний вид изделия, размещенного на теплоотводе.

Полученная конструкция тестового элемента удобна как для измерения электрических и колориметрических характеристик изделия, так и для исследования его теплофизических параметров.

2.1.2 Полупроводниковая лампа ЛПМ 26

Следующим объектом исследования являлись полупроводниковые лампы ЛПМ 26 производства АО НИИПП (г. Томск) в металлопластмассовом исполнении, созданные как аналоги ламп накаливания МН 26-0,12, с двумя типами цоколя В9s/14 и Е10/13. На рисунке 2.5 и 2.6 представлены внешний вид и габаритные размеры данных видов ламп.

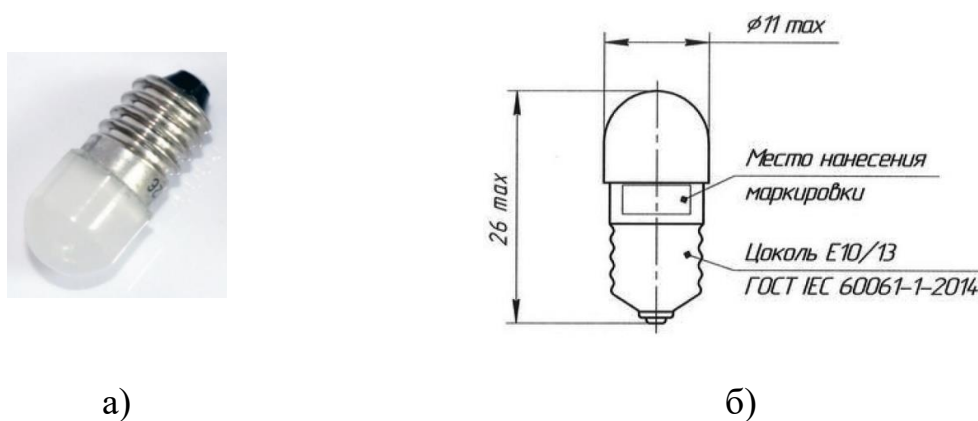


Рисунок 2.5 – Полупроводниковая миниатюрная лампа ЛПМ 26 с типом цоколя Е10/13: а) – внешний вид; б) – габаритный чертеж

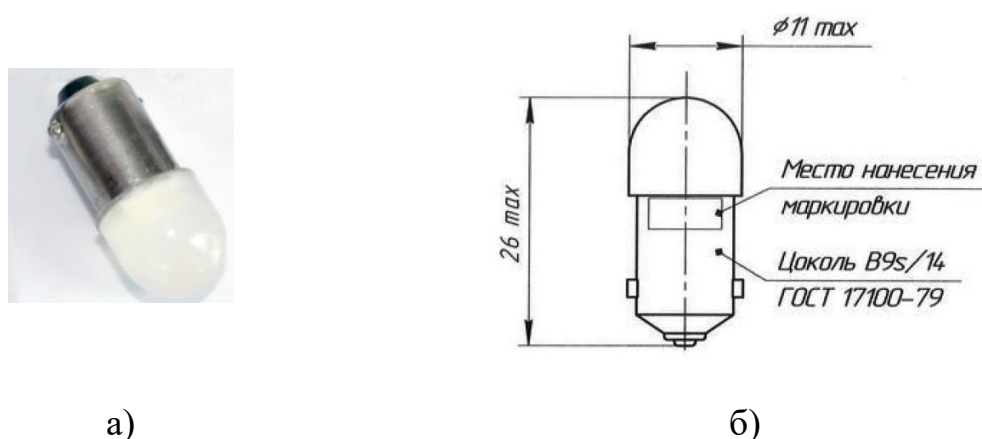


Рисунок 2.6 – Полупроводниковая миниатюрная лампа ЛПМ 26 с типом цоколя В9s/14: а) – внешний вид; б) – габаритный чертеж

устойчивость к перепадам давления и пониженному давлению повышенная устойчивость к вибрационным и ударным нагрузкам).

2.1.3 Светодиодный модуль *TRN-STD28-LX5050-1402_RoHS*

Также проводились исследования теплового режима работы светодиодного модуля *TRN-STD28-LX5050-1402_RoHS* (ООО «Трион», г. Москва) на печатной плате из плакированного алюминия, внешний вид и геометрические размеры которого представлен на рисунке 2.8.

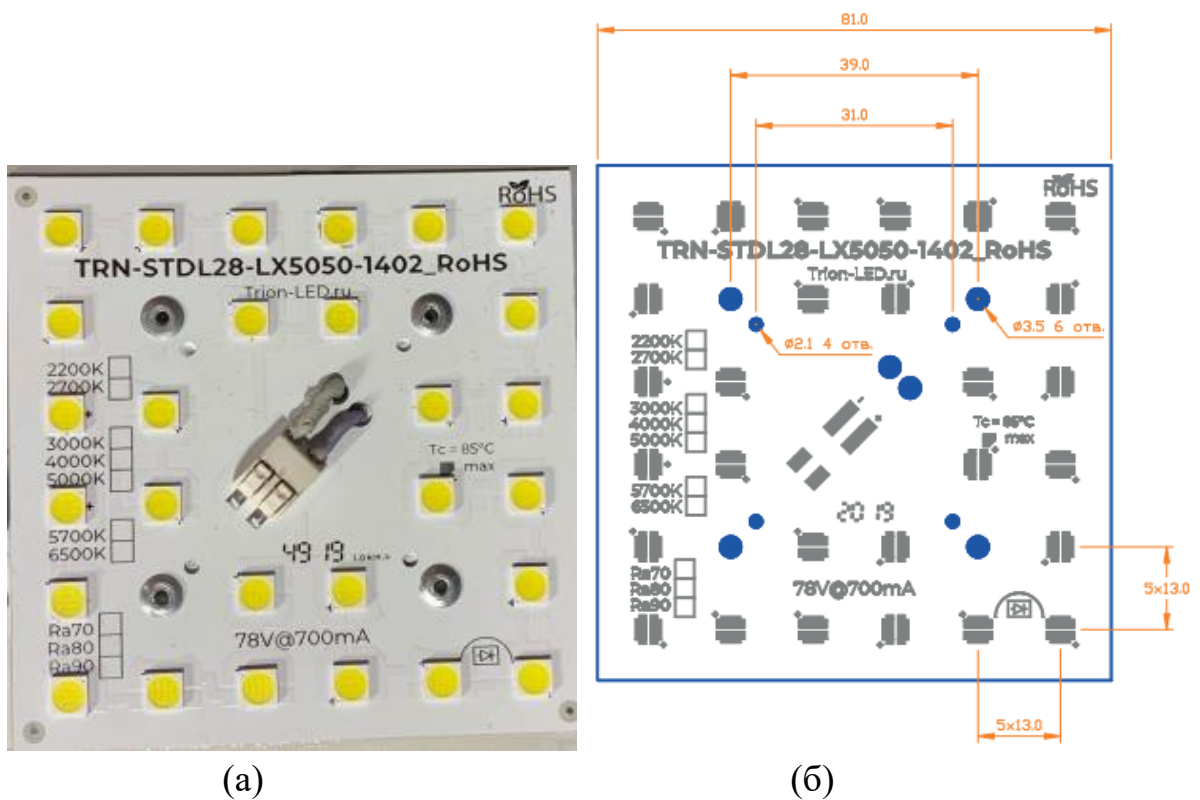


Рисунок 2.8 – Светодиодный модуль *STD28-LX5050-1402_RoHS*: (а) внешний вид, (б) геометрические размеры

Светодиодный модуль используется для создания устройств уличного и промышленного освещения. Модуль оснащен светодиодами Lighting LUXEON 5050 White, световой поток модуля достигает 7600 лм (светоотдача 150 лм/Вт при температуре кристаллов 85°C). Параметры электропитания: 78 В, 700 мА.

Для исследования тепловых режимов данных светодиодных модулей был собран макет светильника на алюминиевом радиаторе. Отдельно от радиатора был

расположен драйвер питания светодиодного модуля. Таким образом, нагрев драйвера питания никак не влиял на тепловые режимы исследуемых модулей.

На рисунке 2.9 представлено расположение светодиодного модуля на алюминиевом радиаторе с вертикально ориентированными ребрами охлаждения.

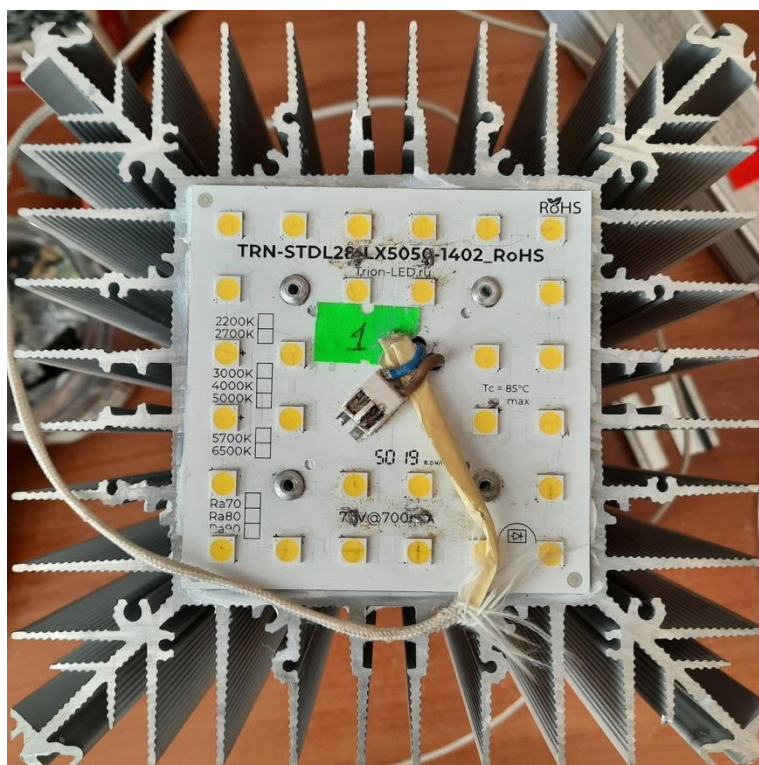


Рисунок 2.9 – Расположение исследуемого светодиодного модуля на радиаторе

Печатная плата данного светодиодного модуля выполнена в виде трехслойной структуры.

Радиатор выполнен из алюминия марки АД31. Коэффициент теплопроводности алюминия данной марки составляет $\lambda = 192$ Вт/(м·К)

Для того, чтобы тепло от печатной платы отводилось более эффективно, между самой платой и радиатором была нанесена термопаста КПТ-8. Характеристики данной термопасты КПТ-8: коэффициент теплопроводности составляет $\lambda = 0,7 - 0,8$ Вт/(м·К); диапазон рабочих температур от -60°C до $+180^{\circ}\text{C}$.

2.2 Используемые методы исследования фотометрических и колориметрических параметров полупроводниковых источников света и светотехнических устройств на их основе

2.2.1 Анализ спектра излучения полупроводниковых источников света

Для исследования спектра излучения тестовых полупроводниковых источников света использовалась установка на основе спектрометра *Avantos AwaSpec-2048* с интегрирующей сферой, куда помещался исследуемый полупроводниковый источник света (рисунок 2.10).

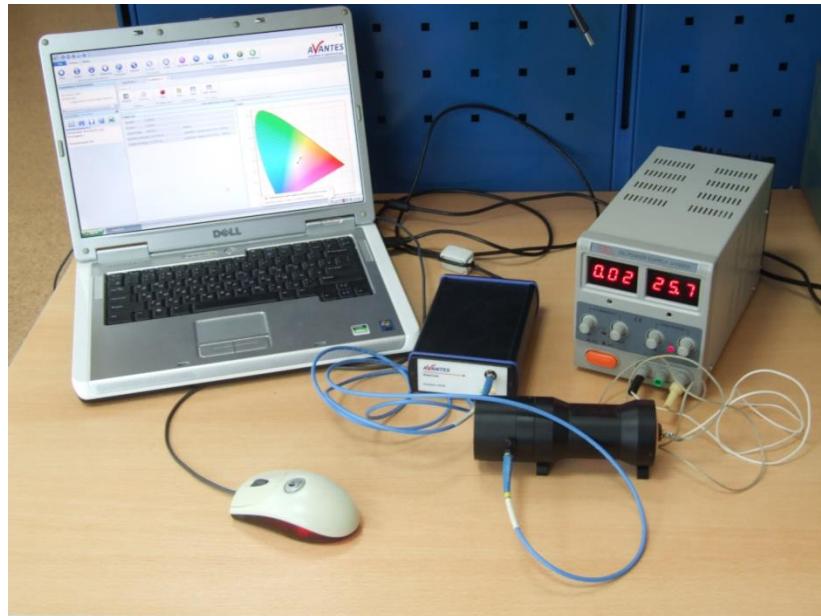


Рисунок 2.10 – Внешний вид установки для исследования спектральных характеристик исследуемых полупроводниковых источников света

На рисунке 2.11 показано типичное спектральное распределение энергии полупроводниковых источников света с различными значениями цветовой температуры [106].

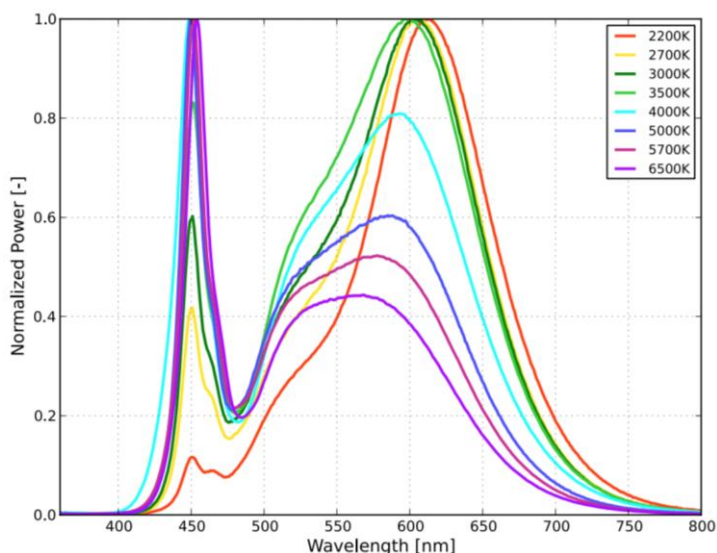


Рисунок 2.11 – Типичный спектр излучения образцов полупроводниковых источников света с различными значениями цветовой температуры (перевод [106])

Обработка результатов измеренных спектров излучения позволяет определить несколько ключевых параметров излучения источников света, которые перечислены ниже

- Полуширина пика (*The Full Width Half Maximum*) – это ширина участка спектра излучения, на котором интенсивность излучения выше половины максимальной интенсивности этого пика.

- Центральная длина волны (*Center Wavelength*). – это длина волны середины между длинами волн слева и справа, для которых интенсивность равна половине максимальной.

- Пиковая длина волны (*Peak Wavelength*) – длина волны максимума спектрального распределения энергии.

2.2.2 Определение колориметрических характеристик полупроводниковых источников света

Для исследования колориметрических и светотехнических характеристик малогабаритных светотехнических устройств и модулей использовался измерительный комплекс *Instrument System GmbH IS-2* (рисунок 2.12), состоящий

из спектрометра *CAS 120-151*, фотометрического шара *ISP500-100* и персонального компьютера [107].

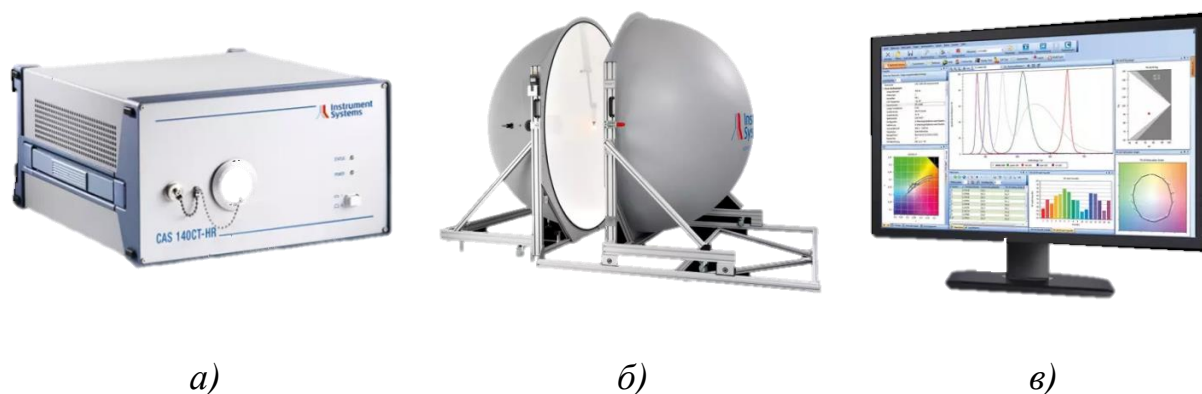


Рисунок 2.12 – Внешний вид измерительного комплекса: *а* – спектрометр *CAS 120-151*; *б* – фотометрический шар *ISP500-100*; *в* – персональный компьютер

В таблице 2.3 представлены технические характеристики измерительного комплекса.

Таблица 2.3 – Технические характеристики измерительного комплекса

<i>Характеристики</i>	<i>Значение</i>
Программное обеспечение	<i>SpecWin Pro</i>
Диапазон длин волн	380-830 нм

Принцип действия комплекса, аналогичен описанному выше и основан на измерении спектральной плотности потока излучения от источника света, устанавливаемого в фотометрический шар *ISP500-100*, с последующим вычислением светового потока, координат цветности и коррелированной цветовой температуры. Методика проведения измерений с использованием измерительного комплекса *IS-2* и примеры определения колориметрических и светотехнических характеристик малогабаритных светотехнических устройств изложены в [108].

При снятии измерительным комплексом *IS-2* спектральных характеристик в режиме реального времени может быть вычислено большое количество световых параметров: колориметрических, фотометрических и радиометрических (см. рисунок 2.13).

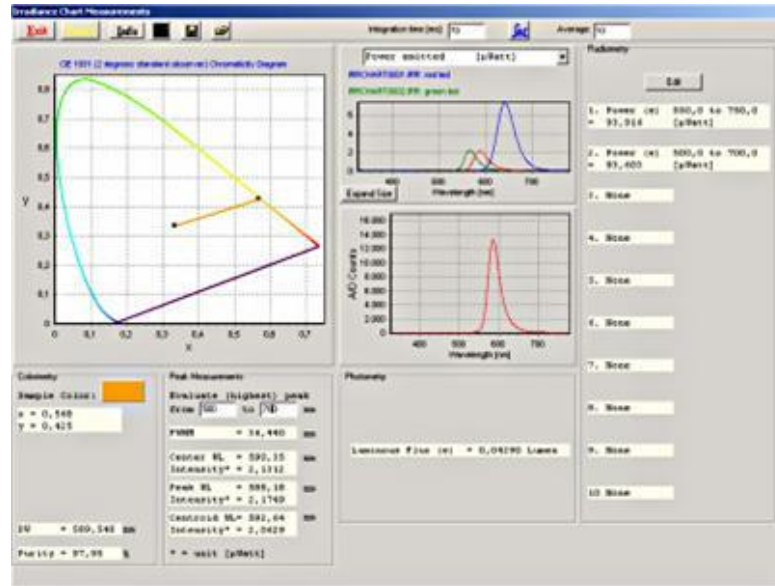


Рисунок 2.13 – Вид окна программы вычисления колориметрических характеристик образцов источников света

Любой цветовой оттенок, характеризующийся спектральной мощностью излучения можно выразить следующими величинами:

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (2.1)$$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (2.2)$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (2.3)$$

где X, Y, Z – значения трёх основных цветов, соответствующие возбуждению (мощности излучения) каждого из цветов для получения излучения цвета $P(\lambda)$;

$P(\lambda)$ – спектральная мощность излучения;

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ – функции согласования цвета.

Каждый из цветовых параметров X, Y и Z определяет приблизительную степень возбуждения каждой группы колбочек человеческого глаза при попадании на них излучения с мощностью излучения $P(\lambda)$.

Для получения безразмерных параметров вводятся координаты цветности. Они определяют степень возбуждения одной из групп цветовых рецепторов, нормированную на суммарное возбуждение:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad (2.5)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y \quad (2.6)$$

Всем цветам соответствуют координаты на цветовой диаграмме принятой МКО в 1931 и 1964 годах для стандартного наблюдателя под углом зрения 2 или 10 градусов соответственно на длине волны λ (рисунок 2.14).

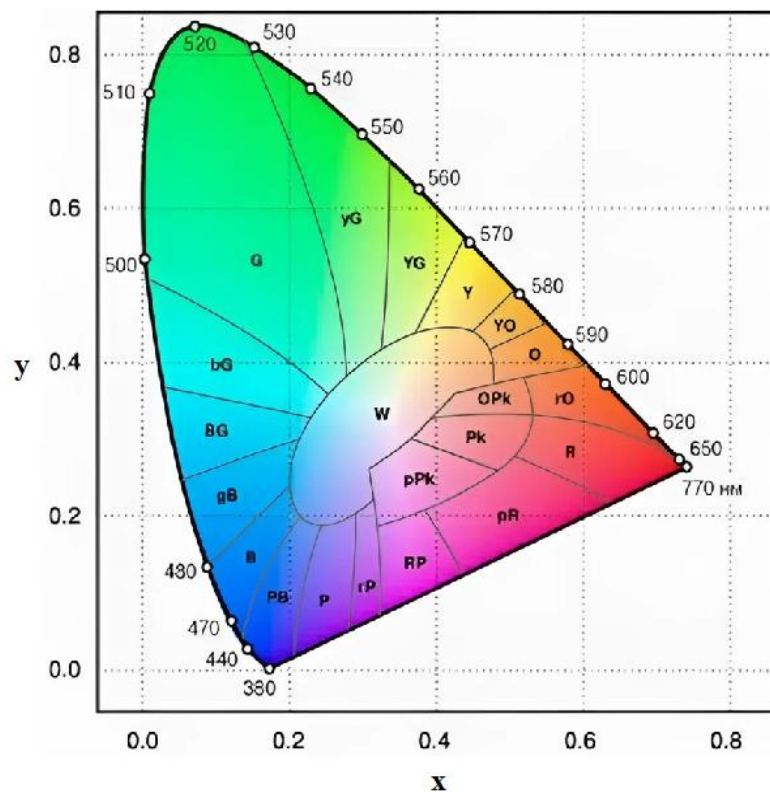


Рисунок 2.14 – Цветовая диаграмма МКО 1931 г.

Оттенки зеленого цвета (см. рисунок 2.14) соответствуют наибольшим значениям y , оттенки красного цвета - наибольшим значениям x , а оттенки синего - наибольшим значениям z , которые в соответствии с уравнением расположены в

области малых значений x и y или в области начала координат цветовой диаграммы. Монохроматические цвета расположены по периметру, а белый цвет находится в центре диаграммы.

2.3 Используемые методы измерения температуры и теплового сопротивления исследуемых образцов

2.3.1 Определение температуры полупроводникового кристалла источника света через вычисление теплового сопротивления

В работе использовалось несколько методов определения температуры активной области полупроводниковых источников света. Наиболее распространенный метод определения температуры – это вычисление температуры полупроводникового кристалла источника света через тепловое сопротивление конструктивных слоев источника света.

В общем случае температура р-п перехода зависит от температуры окружающей среды, мощности выделяемой тепловой энергии в активной области полупроводникового кристалла и может быть рассчитана по формуле:

$$T_{p-n} = T_{окр} + P (R_{p-n} + R), \quad (2.7)$$

где T_{p-n} – температура р-п перехода;

$T_{окр}$ – температура окружающей среды;

R_{p-n} – тепловое сопротивление между р-п переходом и корпусом;

R – тепловое сопротивление между корпусом и окружающей средой.

Тепловое сопротивление определяется как отношение разности температур к соответствующему рассеянию мощности. Для того, чтобы узнать конечное тепловое сопротивление, требуется вычислить значение теплового сопротивления каждого слоя между р-п переходом и окружающей средой. Для этого используется коэффициент теплового сопротивления R , который рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{d}{(\lambda \cdot A)}, \quad (2.8)$$

где d – толщина слоя материала;

A – контактной площади;

λ – коэффициент теплопроводности.

Далее, чтобы посчитать общее тепловое сопротивление всей печатной платы, необходимо математически просуммировать тепловые сопротивления каждого слоя по формуле:

$$R = R_{thCu} + R_{thOxide} + R_{thSubstrat} + \dots \quad (2.9)$$

Очевидно из формулы 1.1, что тепловое сопротивление уменьшается с уменьшением толщины слоя материала и увеличением его теплопроводности. Как правило, при разработке осветительных устройств на основе полупроводниковых источников света на этапе теплового расчета и проектирования конструкции обеспечиваются все необходимые меры для наилучшего отвода тепла от полупроводникового кристалла. Примером этого может быть приведенная на рисунке 2.15 конструкция односторонней печатной платы с металлическим основанием.

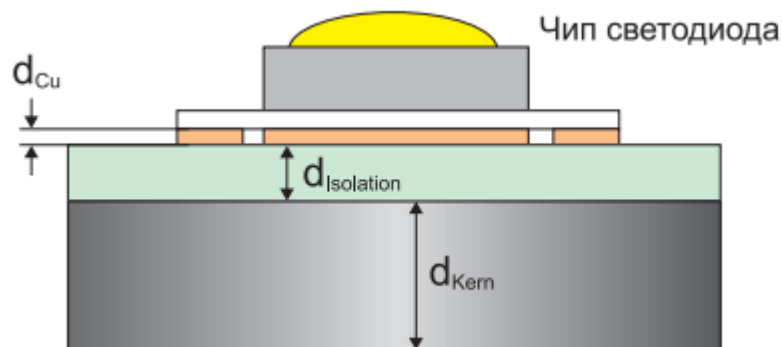


Рисунок 2.15 – Структура односторонней печатной платы осветительного устройства с металлическим основанием

В печатных платах этого типа используется металлическое основание или сердцевина из алюминия или меди с выращенным на нем окислом, который служит для электрической изоляции, на котором закрепляется медная фольга. Таким образом, само металлическое основание является не только теплоотводящим элементом, но и силовой конструкцией, на которой располагается полупроводниковый источник света.

2.3.2 Бесконтактное измерение температуры активной области кристалла

Температура активной области полупроводникового кристалла светодиода в значительной степени определяет величину светоотдачи, спектр излучения [109]. Однако, зная паспортное значение теплового сопротивления р-n переход – корпус, не всегда возможно точно измерить температуру активной области кристалла.

В данной работе для контроля температуры активной области использовалась температурная зависимость параметров спектра излучения. В частности, использовалась зависимость изменения полуширины спектра от изменения температуры активной области кристалла. Для этого определялся температурный коэффициент (приращение ширины спектра излучения при нагреве на один градус, нм/К), проводя измерения ширины спектра излучения при нескольких значениях температуры кристалла [109, 110] с использованием экспериментальной разработанной установки для температурной калибровки полуширины спектра излучения (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Внешний вид установки для температурной калибровки полуширины спектра излучения

Установка состоит из спектрометра AvaSpec-2048 с оптическим разрешением на уровне 0,04 нм в спектральном диапазоне от 200 нм до 1100 нм, спектрометр, генератора прямоугольных импульсов, запоминающего осциллографа,

регистрирующего устройства, специализированного программного обеспечения *AvaSoft*, дополнительных измерительных элементов (термопара и мультиметр) и интегрирующей сферы. Функциональная схема установки представлена на рисунке 2.17.



Рисунок 2.17 – Функциональная схема измерительного комплекса для проведения исследований температурных зависимостей

Схема проведения измерений следующая. Полупроводниковый источник света помещается в интегрирующую сферу (оптический компонент) и подключается к блоку питания 1. Приёмный оптоволоконный кабель присоединяется к SMA-коннектору, расположенному под углом 90 градусов относительно входного порта в участке сферы, отделенном световым экраном (перегородкой) для исключения попадания первых отражений в приёмное оптоволокно. Для повышения температуры корпуса светодиодного устройства был применен нагревательный узел, подключенный к блоку питания 2. Также к корпусу светодиодного устройства подключены термопара и мультиметр для контроля температуры.

Корпус светодиодного устройства подвергался нагреву в диапазоне температур от комнатной до $+100^{\circ}\text{C}$. Результаты аналитических исследований спектрофотометром фиксировались каждые 10°C изменения температуры корпуса [111]. По полученным экспериментальным результатам строилась калибровочная зависимость температуры от длины волны в максимуме спектра излучения. По

построенной калибровочной зависимости в последующем определялась непосредственно температура $p-n$ перехода.

2.3.3 Тепловизионный метод измерения поверхностного распределения температуры исследуемых объектов с помощью тепловизора

Целью тепловизионных измерений является выявление тепловых аномалий на объекте для оценки его технического состояния и предотвращения возможных неисправностей. Методика может применяться для контроля качества светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников света, так как позволяет выявить конструктивные недоработки и дефекты.

Для проводимых исследований использовался инфракрасный тепловизор *RGK* модели *TL-80*. Тепловизоры инфракрасные *RGK* модели *TL-80* предназначены для бесконтактного измерения пространственного распределения радиационной температуры объектов по их собственному тепловому излучению в пределах зоны, определяемой полем зрения оптической системы тепловизоров, и визуализации этого распределения на дисплее тепловизора. Метрологические и технические характеристики тепловизора *RGK TL-80* приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Метрологические и технические характеристики тепловизора *RGK* модели *TL-80*

Наименование характеристики	Значение характеристики
1	2
Оптические характеристики	
Поле зрения/минимальное расстояние фокусировки	170x170/0,5 м
Пространственная разрешающая способность (IFOV)	3,78 мрад
Тепловая чувствительность (NETD)	<0,1°С при +30°С /100 мК
Частота обновления кадров	50 Гц

Продолжение таблицы 2.4

1	2
Фокусировка	Ручная

Увеличение	1-32X непрерывное, цифровое
Тип детектора	Неохлаждаемый микроболومتر, 80x80 пикселей
Измерения	
Температурный диапазон объекта	-20°C до + 150°C; 0°C до + 350°C
Погрешность	± 2°C или ± 2 % от показания
Анализ результатов измерений	
Функции измерений (анализ)	Центральная точка, холодная/горячая подвижные точки
Коэффициент излучения	От 0,01 до 1,0 (таблица/ручной режим)
Компенсация отражённой температуры	Да (ручная)

Перед началом измерений проводилась калибровка прибора с учетом рабочей температуры окружающей среды и условий съёмки, а также уточнение излучательной способности материала исследуемого объекта. Затем производился расчет поля зрения тепловизором на основании указанных в паспорте прибора характеристик (рисунок 2.18)

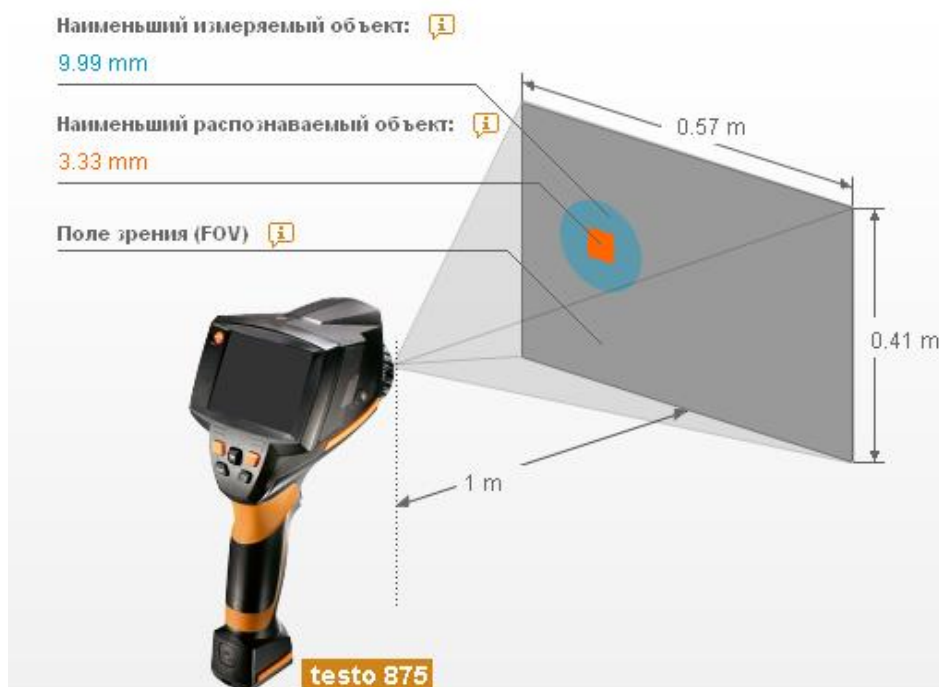


Рисунок 2.18 – Определение поля зрения тепловизора

Вторым этапом проходила сама процедура измерения. Необходимо расставить оборудование, с учетом:

- рассчитанного поля зрения;
- угла съёмки обеспечивал максимальное покрытие объекта. Углы съёмки для диэлектриков должны находиться в диапазоне от 0 до 60°, для металлических поверхностей – от 0 до 40°;
- скорректировать расстояние до объекта и применить поправочный коэффициент (0.56–0.58) для повышения точности.

Сами измерения проводились с учетом всех требований и факторов: угла съёмки, эмиссионной способности материала, условий окружающей среды. Следует избегать сильного воздействия прямого солнечного света. Для более точных измерений рекомендуется проводить съёмку тепловизором в непосредственной близости от предполагаемых мест с потенциальными зонами тепловых аномалий.

Третий этап предполагает съёмку и получение те термографических изображений. Необходимо убедиться, что все участки объекта исследованы, включая сложные для доступа зоны.

На этом этапе необходимо учесть использование критерия Джонсона:

- для обнаружения объектов: минимальное разрешение – 2 пикселя по меньшему размеру проекции объекта;
- для распознавания объекта (например, определение типа): разрешение – 6 пикселей;
- для идентификации объекта (определение конкретных признаков): разрешение – 12 пикселей.

На четвертом этапе происходит анализ данных. Для этого сначала полученные изображения должны быть проанализированы для выявления температурных аномалий. Для точной оценки необходимо сопоставить термограмму с видимыми контурами объекта и учесть возможные отражения и наложения сигналов. Затем, фактические температуры сравниваются с

нормативными значениями для данного типа объекта. Отклонение от нормативов может свидетельствовать о наличии неисправности.

Разработанную методику можно адаптировать в зависимости от специфики объекта и задачи съёмки, учитывая требования нормативно-технической документации и особенности тепловизионной техники. Адаптированная методика была использована при дистанционном зондировании поверхности земли, а также при определении параметров внутренних источников тепла и их температуры.

2.4 Выводы по разделу 2

методов и подходов, так и экспериментальных, разработанных и В данном разделе приведены сведения об объектах исследования, приборах и методиках экспериментальных исследований. Совокупность использованных в работе методов исследований, а также используемого оборудования позволяет провести детальное исследование теплового режима работы осветительных устройств на основе полупроводниковых источников света. Для оценки температуры активной области полупроводниковых источников света предполагается использование как стандартных апробированных совместно с автором диссертационной работы.

3 ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В данном разделе представлены экспериментальные результаты исследования теплового режима работы светотехнических устройств и его влияние на характеристики составных элементов полупроводниковых источников света. Базовым составным элементом устройства является полупроводниковый кристалл, покрытый люминофором. Именно он является источником тепловыделения, и только его рабочая температура определяет стабильность светотехнических характеристик и надежность светотехнического устройства. Измерение тепловых характеристик отдельного полупроводникового кристалла не вызывает особых трудностей, но нетривиальной и важной задачей, решаемой в данной главе, является измерение температуры полупроводникового кристалла, находящегося в составе конструкции модуля или устройства. Основные результаты исследования теплового режима работы осветительных устройств на основе полупроводниковых источников света и их элементов опубликованы в работах [108, 111-117].

3.1 Взаимосвязь температуры активной области полупроводникового источника света и полуширины спектра его излучения

Механизм излучения в полупроводниковых источниках света основан на рекомбинации носителей заряда. При этом избыток энергии $\Delta E \approx E_g$ (равный величине запрещенной зоны) может излучаться в виде фотона с энергией $h\nu$. Для полупроводниковых структур на основе соединений III–V (GaN, InGaN, AlGaInP и т. д.) эта энергия может лежать в видимом или ближнем ультрафиолетовом диапазоне. Более подробно рекомбинация носителей заряда и получение белого света рассмотрены в разделе 1 диссертационного исследования. Известно, что ключевой фактор, определяющий длину волны и спектральные характеристики излучения — это ширина запрещенной зоны E_g , которая при повышении

температуры уменьшается. Обычно это описывают формулой вида (например, для GaN/InGaN):

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T - \beta T^2, \quad (3.1)$$

где α , β — коэффициенты, зависящие от состава полупроводника (InGaN, AlGaN и др.);

T — температура (К).

В результате уменьшения ширины E_g с ростом температуры максимум спектра излучения (пик излучения) кристалла сдвигается к более длинноволновой области (энергия фотонов понижается), а ширина спектра увеличивается (возрастает число носителей с более высокими тепловыми энергиями) [112].

Для описания формы спектра и распределения интенсивности по энергиям (или длинам волн), используют разные упрощённые модели. Одной из известных является квазинепрерывное приближение, где интенсивность $I(h\nu)$ пропорциональна произведению: плотности состояний электронов и дырок, вероятности (степени заполнения) этих состояний, вероятности перехода с испусканием фотона энергии $h\nu$.

Само выражение при этом имеет вид:

$$I(h\nu) = B(h\nu)(h\nu - E_g(T))^m \exp\left(-\frac{h\nu - E_g(T)}{kT}\right), \quad (3.2)$$

где B — некоторая константа пропорциональности, m — показатель, зависящий от размерности полупроводника и распределения носителей, k — постоянная Больцмана.

Из экспоненциального характера данной зависимости следует, что с увеличением температуры T энергетическое распределение фотонов расширяется.

Если пик излучения находится в районе λ_{max} , то полуширина спектра $\Delta\lambda_{0.5}$ описывает, насколько «растянут» спектр. Чем выше температура, тем более «размыта» граница между зонами, и тем больше фотоны с энергиями, отличающимися от $E_g(T)$ на большие величины (и в меньшую, и в большую

сторону). Данный эффект в полупроводниковых структурах описывается выражением:

$$\Delta E_{0.5} \approx 1.8kT \text{ или } \Delta\lambda_{0.5} \approx \frac{1,8kT\lambda^2}{hc}, \quad (3.3)$$

Экспериментальные зависимости формы спектра излучения полупроводниковых источников света при разогреве активной области приведены на рисунке 3.1 [112].

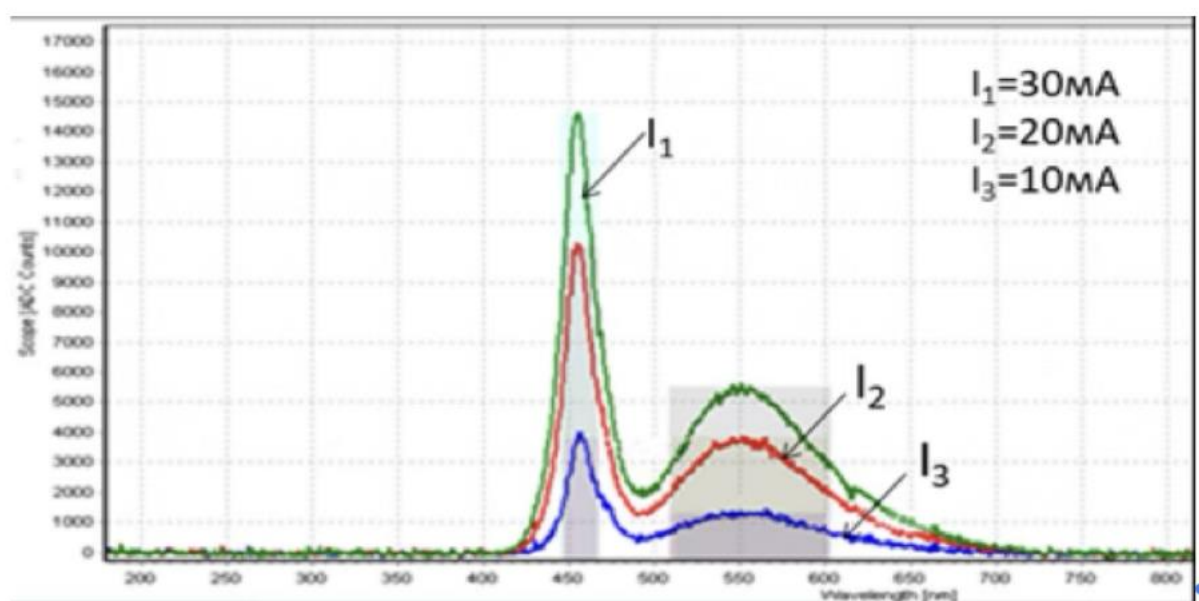


Рисунок 3.1 – Изменение формы спектра излучения полупроводникового источника света

Механизмов, влияющих на уширение спектра излучения, и действующих по отдельности или в совокупности может быть несколько.

1) При повышении температуры всё больше электронов (и дырок) получает дополнительную тепловую энергию, что даёт вклад в высокоэнергетические и низкоэнергетические «хвосты» спектра.

2) В реальных кристаллах (InGaN/GaN) может существовать флуктуация состава (и, соответственно, E_g), дислокации и иные дефекты. Они дополнительно расширяют спектр.

3) С ростом температуры возрастание скорости тепловых процессов может

усиливать влияние этих неоднородностей.

4) Если речь идёт о белом полупроводниковом источнике света на базе синего (или УФ) кристалла и люминофора, часть спектра формируется в люминофоре, который сам имеет свою температуру и свойства. Это может дать дополнительное «уширение».

Для гомопереходов (простых структур) полупроводниковых структур температурная зависимость спектра описывается напрямую через $\Delta E_g(T)$ при этом справедливо выражение (3.3). Оно говорит о том, что при росте температуры гомопереходного полупроводника ширина (FWHM) линии излучения возрастает пропорционально T , подтверждая, что основной вклад в уширение вносит именно термическая энергия носителей. Таким образом, формула даёт оценку порядка величины для термического уширения в простых (не многослойных) прямозонных структурах: порядка двух kT (с поправкой ~ 1.8). Однако в гетероструктурах GaN–InGaN со множеством квантовых ям (MQW) механизм температурных сдвигов усложняется и «эффективная» зона $\Delta E_g'$ зависит дополнительно от квантовых подзон и деформационных слагающих ($\sum \Delta E_i$)

$$\Delta E_g' = \Delta E_g(\text{InGaN}) + E_{c1} + E_{v1} + \sum_i \Delta E_i, \quad (3.43)$$

где $\Delta E_g(\text{InGaN})$ — ширина основного материала (InGaN), E_{c1} и E_{v1} — положения первых квантовых подзон для электронов и дырок, а $\sum \Delta E_i$ суммирует эффекты деформационных полей, неоднородностей состава и квантово-размерных явлений.

В сумме все эти механизмы дают большее общее уширение (в энергетических единицах), чем в простой гомогенной структуре. Поэтому в реальных гетероструктурах все входящие составляющие формулы (3.4) приводят к тому, что спектр излучения существенно меняется при изменении температуры. И на практике это часто выражается эмпирическими коэффициентами порядка:

$$\Delta E_{0.5} \approx 3 \div 4kT, \quad (3.5)$$

Указанные особенности дают уширение формы спектра, при котором спектральные линии (или полосы) теряют чёткие границы и становятся более «растянутыми» по диапазону длин волн (или энергий). Основные причины расширения интенсивности по большему участку шкалы длин волн следующие:

- при повышении температуры электроны и дырки получают разные энергетические состояния, и излучение возникает с более широким разбросом энергий;

- в гетероструктурах со множеством квантовых ям могут существовать области с отличающимися параметрами (различный состав, деформации), что даёт каждую «микрзону» со своим собственным диапазоном испускания. В итоге суммарный спектр оказывается шире;

- разные квантовые ямы (или разные уровни в одной яме) создают дополнительные подзоны, внося вклад в общую ширину излучения.

За счет этих эффектов форма спектра становится более сглаженной и затруднительно определить пик излучения, что существенно усложняет контроль температуры по максимуму спектра. Однако возможно применять полуширину спектра в качестве температурного индикатора для сложных гетероструктур. Эксперименты показывают, что изменения (или соответствующего энергетического уширения) при нагреве хорошо коррелируют с реальной температурой активной области. Таким образом, учёт «эффективной» ширины запрещённой зоны $\Delta E_g'$ с учётом квантовых ям и деформационных эффектов даёт возможность использовать метод полуширины даже в условиях сложного состава и неоднородности GaN–InGaN-структур.

Экспериментально часто обнаруживают, что $\Delta\lambda_{0.5}$ линейно или квазилинейно растёт при увеличении температуры в диапазоне от комнатных значений до

$$\Delta\lambda_{0.5}(T) = \Delta\lambda_{0.5}(T_0) + \gamma(T - T_0). \quad (3.6)$$

~100 °C:

$$\Delta\lambda_{0.5}(T) = \Delta\lambda_{0.5}(T_0) + \gamma(T - T_0) \quad (3.3)$$

где γ – коэффициент (нм/°С), определяемый экспериментально.

Точный вид функции может отличаться (быть более сложной), но во многих работах линейная аппроксимация дает удовлетворительную точность в узком температурном диапазоне.

3.2 Экспериментальная методика определения температуры кристалла полупроводникового источника света

Определение температуры кристалла полупроводникового источника света по изменению полуширины спектра его излучения реализуется путём размещения исследуемого светодиода в термостате и проведения измерений спектра излучения при фиксированном прямом токе в двух режимах — непрерывном и импульсном. Импульсный режим особенно важен, так как позволяет исключить саморазогрев полупроводникового элемента: для этого используют импульсы длительностью порядка 1 мкс и скважность не менее 1000. В качестве образцов для исследования зависимости полуширины спектра излучения от температуры (в импульсном режиме) были отобраны два типовых синих полупроводниковых источника света: один производства ОАО «НИИПП» (Россия) и второй — компании *SemiLed* (Китай). Оба выполнены в пластмассовом корпусе типа 5050 без дополнительного теплоотвода. Подробные технические характеристики этих изделий изложены в разделе 2, а процедура регистрации спектра с помощью волоконно-оптического спектрометра *USB2000* описана в подразделе 2.3.

В ходе экспериментов корпус исследуемого полупроводникового источника света нагревали от комнатной температуры до +100 °С, регистрируя спектрофотометрические данные при каждом повышении температуры на 10 °С. На рисунке 3.2 приведены соответствующие спектры, показывающие смещение обоих пиков излучения в длинноволновую область при возрастании тока, а также увеличение их интенсивности [118, 119]. Одновременно с ростом силы тока

изменяются все фотометрические параметры (интенсивность, световой поток), и возрастает температура кристалла, что вызывает дополнительные спектральные сдвиги, включая переход части излучения в более коротковолновой (синий) диапазон и сопровождающееся «охлаждение» света (повышение цветовой температуры). Вместе с тем уменьшение ширины запрещённой зоны при нагреве приводит к смещению части спектра в длинноволновую область. Сочетание этих эффектов объясняет, почему при варьировании тока и температуры спектральные характеристики «белых» полупроводниковых источников могут значительно изменяться — как по положению основных пиков, так и по общему цветовому восприятию [116].

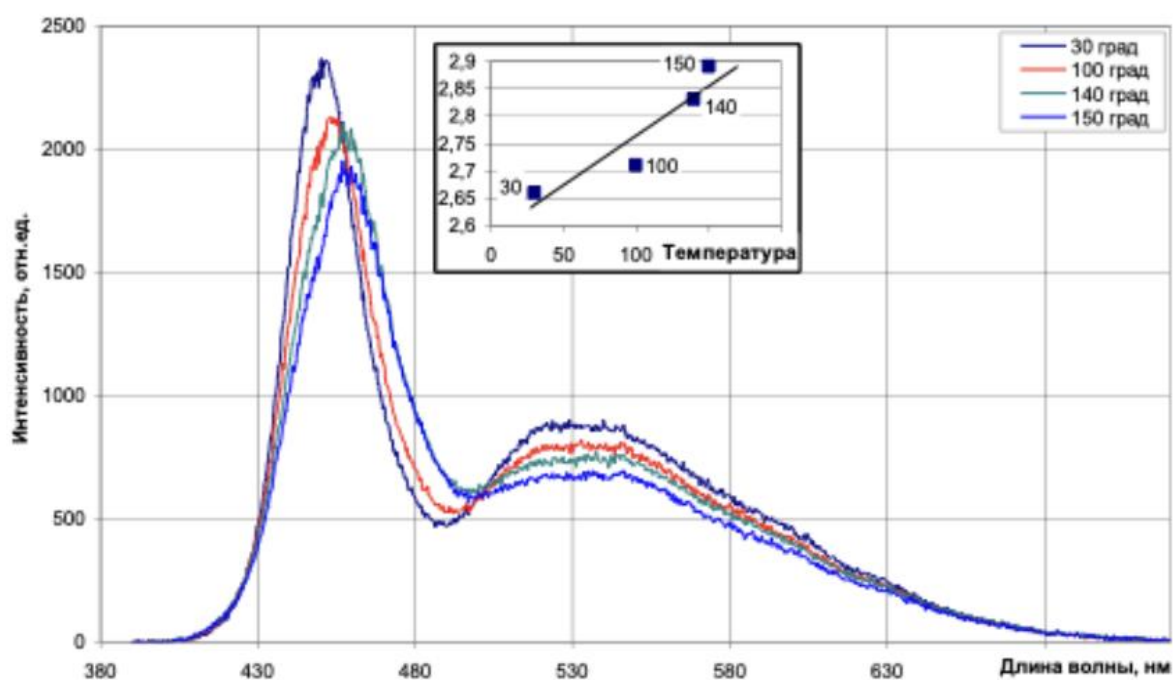


Рисунок 3.2 – Характерные закономерности изменения формы спектров при разных температурах

Экспериментальные и аппроксимирующие зависимости полуширины спектра ($FWHM$) от температуры корпуса для исследуемых источников света приведены на рисунке 3.3.

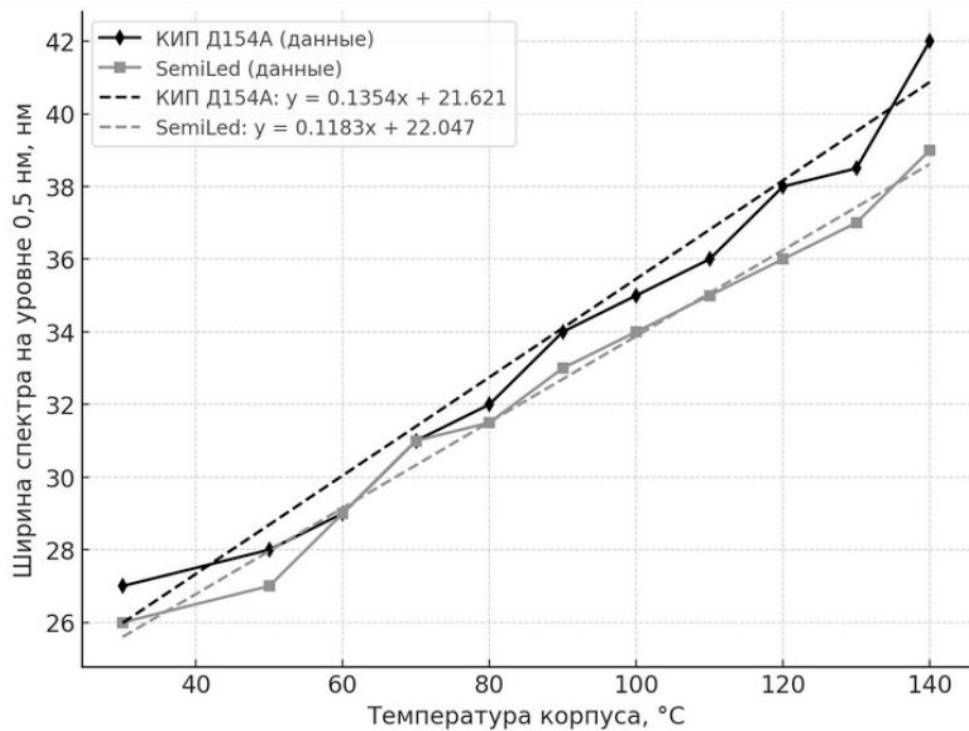


Рисунок 3.3 – Калибровочные зависимости полуширины спектров излучения исследуемых образцов

По экспериментально полученным зависимостям формы спектра излучения от температуры корпуса возможно определить и температурную зависимость положения максимума пика излучения (см. таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Зависимость пика максимума спектра излучения от температуры корпуса

	I=100мА							
T, °С	35	45	55	65	75	85	95	105
λ_{\max} , нм	451,9	452,6	453,4	454	454,7	455,3	456,1	456,9

Полученные и обработанные экспериментальные результаты легли в основу построенной калибровочной зависимости температуры от длины волны в максимуме, представленной на рисунке 3.4.

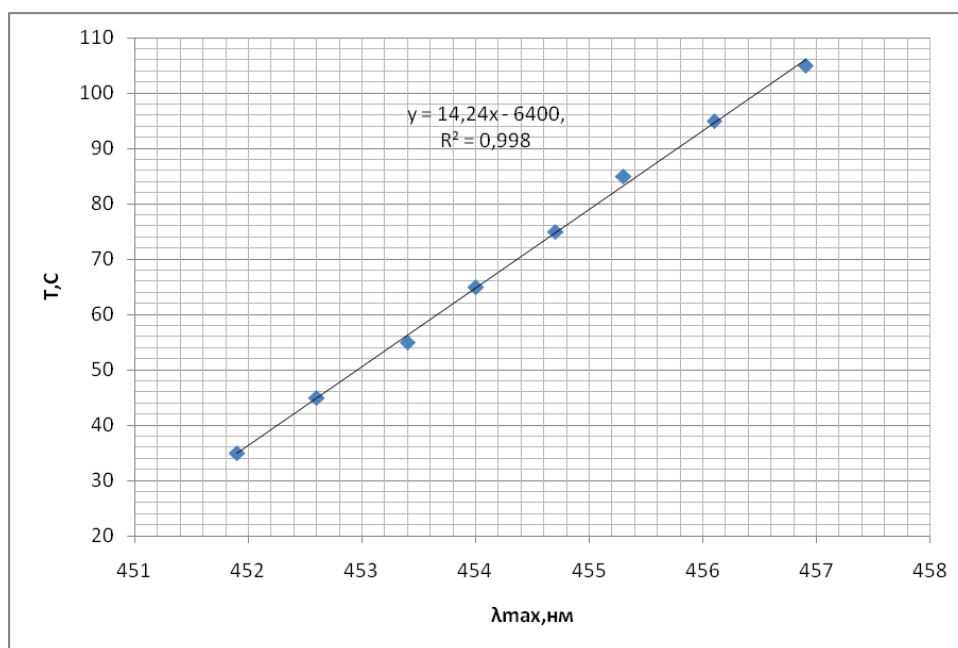


Рисунок 3.4 - Температурная зависимость длины волны в максимуме спектра излучения исследуемых источников света

Таким образом, полуширина спектра излучения и положение его основного пика эффективно могут быть использованы для определения температуры активной области кристалла источника света [114]. Однако следует отметить, что температурное изменение положения пика излучения, менее чувствительно, чем изменение полуширины спектра. Следовательно, использование в качестве термочувствительного параметра полуширины спектра, при бесконтактных измерениях температуры светодиодных чипов более предпочтительно.

3.3 Температурная зависимость колориметрических характеристик полупроводниковых источников света

В связи с тем, что все параметры полупроводникового источника света зависят от термодинамической температуры кристалла и люминофора, то и цветовая температура, как параметр источника света, является термозависимой величиной [108]. На рисунке 3.5 представлена зависимость цветовой температуры осветительных устройств на основе изделия КИПД154А92 от температуры их корпуса [111].

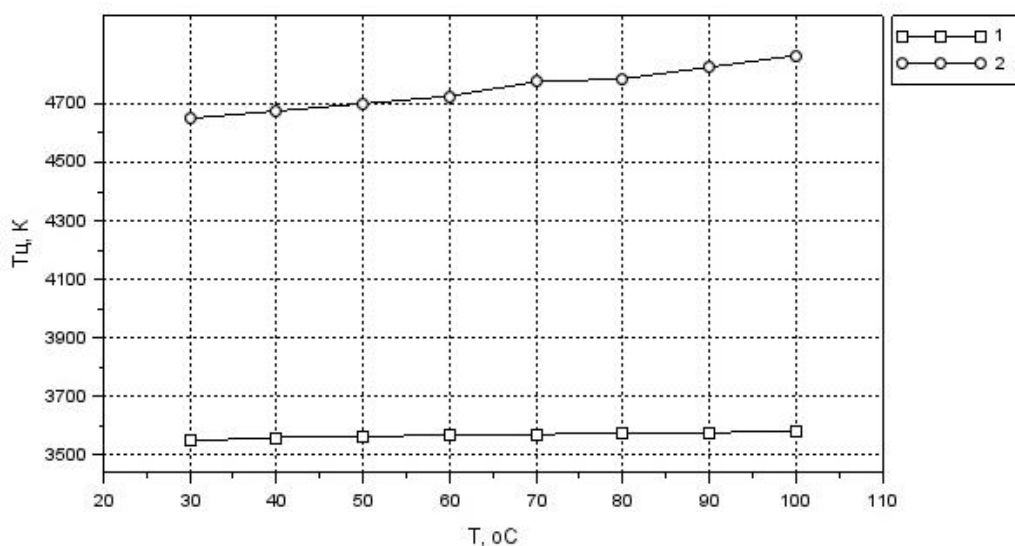


Рисунок 3.5 – Зависимость цветовой температуры светодиодных устройств на основе КИПД154А92 от температуры корпуса: 1 - «теплый свет» (3500К), 2 - «холодный свет» (4700К)

Полученные зависимости показывают, что при повышении температуры корпуса светодиодных устройств увеличивается и их цветовая температура. В большей степени это проявляется для светодиодных устройств «холодного света». Их цветовая температура увеличилась с 4650 до 4830 К, то есть на 180 К. Цветовая температура источников тёплого света изменилась с 3550 до 3580 (на 30 К). Такое отличие для светодиодных устройств тёплого и холодного света связано с различиями в составах люминофорных покрытий.

При исследовании зависимости светового потока источника света от температуры (рисунок 3.6) было установлено, что при увеличении внешней температуры падение светового потока источника белого света происходит в диапазоне длин волн от 500 до 800, что вызвано уменьшением эффективности люминесценции люминофорного покрытия.

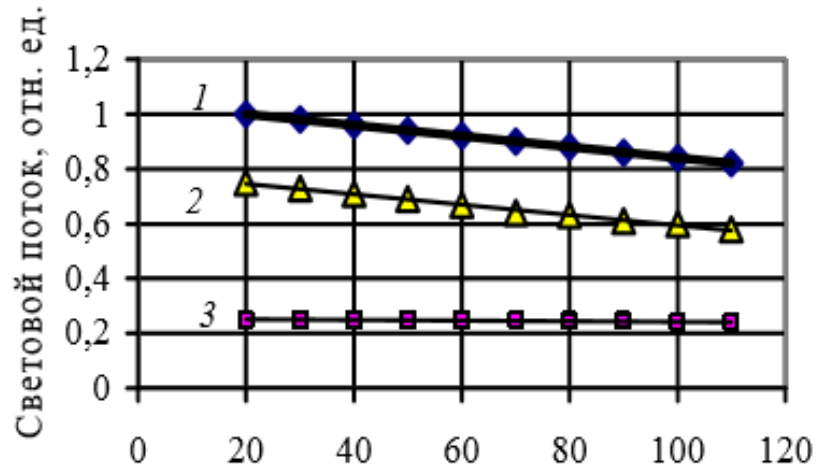


Рисунок 3.6 – Зависимость светового потока источника света от температуры: 1 – полный световой поток; 2 – световой поток в диапазоне длин волн от 500 до 800 нм; 3 – световой поток в диапазоне длин волн от 420 до 480 нм

На рисунке 3.7 представлены экспериментальные результаты измерений температуры кристалла и люминофорного покрытия при различных значениях прямого тока и при температуре корпуса 20 °С и 85 °С.

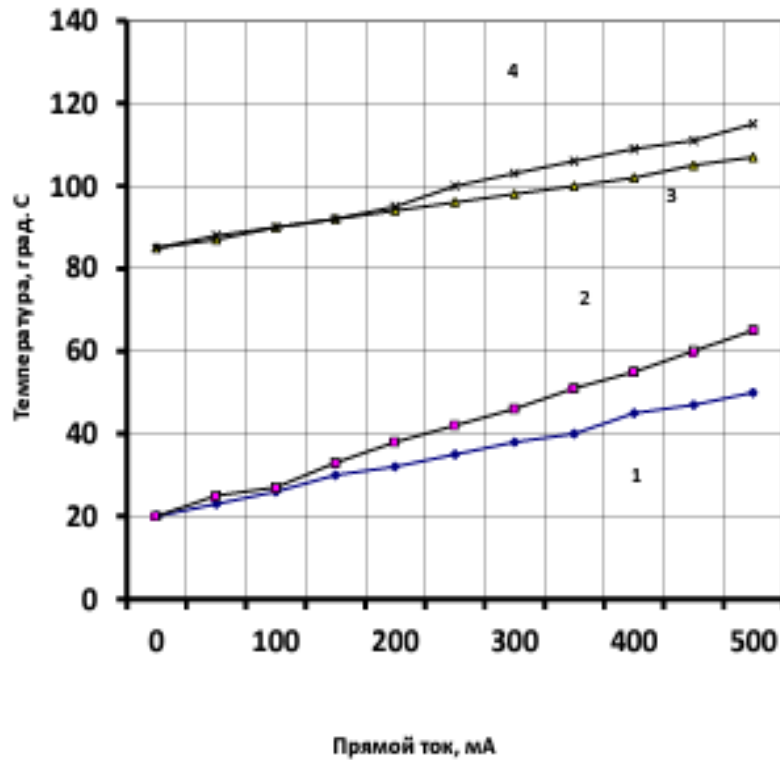


Рисунок 3.7 – Зависимость температуры кристалла (1,3) и температуры люминофорного покрытия (2,4) от прямого тока: 1,2 – для температуры корпуса +20 °С; 3,4 – для температуры корпуса +85 °С

Из полученных зависимостей следует, что люминофорное покрытие имеет температуру на 10-15 °С выше, чем температура кристалла. При повышении температуры испытаний до 85 °С разность температур уменьшается, что может быть связано, как с уменьшением мощности излучения кристалла, так и с увеличением теплопроводности материала покрытия.

Для преобразования излучения кристалла в красно-желтый свет используются твердые кристаллические люминофоры, преимущественно на основе порошка из иттрий-алюминиевых и иттрий-гадолиновых гранатов легированных церием [20]. Порошок, состоит из зерен сферической или неправильной формы размерами в пределах от 3 до 30 мкм. Для обеспечения прочности и технологичности порошок смешивают с кремний-органическим компаундом, который в виде слоя толщиной от 200 до 500 мкм, наносится на поверхность кристалла. Возбуждающее излучение, проходя сквозь слой композита, претерпевает отражение и поглощение на отдельных зернах люминофора. В результате в зернах порошка возникает свечение люминесценции, которое, распространяясь в слое, рассеивается и частично поглощается. Если предположить, что люминофор является направленно-рассеивающей с преимущественным пропусканием «мутной средой», тогда, путем сопоставления диаграмм направленности излучения кристалла без люминофора и с люминофором, возможно, определить коэффициенты поглощения и рассеяния излучения покрытия [120, 121]. Таким образом, входящий в люминофор поток излучения из кристалла испытывает поглощение и рассеяние, а его величина в осевом направлении выражается формулой:

$$I(d) = I_{\alpha}(d) + I_{\rho}(d) = I_0 \exp[-(\alpha + \rho)d] \quad (3.7)$$

где $I(d)$ - поток излучения, проходящий через люминофор; I_0 – поток излучения входящий в люминофор; $I_{\alpha}(d)$ - поток излучения поглощенный в люминофоре; $I_{\rho}(d)$ -поток излучения рассеянный люминофором; d – толщина слоя

люминофора; α – коэффициент поглощения люминофора; ρ – коэффициент рассеяния люминофора. Экспериментально установлено, что типичные диапазоны изменения коэффициента поглощения находятся в интервале от 30 см^{-1} до 70 см^{-1} , а коэффициента рассеяния от 20 см^{-1} до 30 см^{-1} .

Интенсивность свечения люминофора зависит не только от величины поглощенного потока излучения, но и от температуры, чем выше рабочая температура, тем слабее свечение. Для эффекта термического гашения люминесценции характерно уменьшение выходной оптической мощности за счет увеличения вероятности безизлучательных переходов. Рабочая температура люминофора зависит как от температуры окружающей среды, так и от температуры поверхности полупроводникового кристалла. Кроме того, разогрев люминофора может происходить под воздействием поглощенного в нем излучения кристалла.

Повышение температуры окружающей среды неоднозначно влияет на изменение величины суммарного внешнего квантового выхода источника света [115]. Так зависимость светового потока от температуры кристалла без люминофора может быть описана с помощью известной формулы [122]:

$$I(T) = I(300\text{K}) \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right) \quad (3.8)$$

где $I(300\text{K})$ – световой поток при температуре кристалла 300К; T_c – характеристическая температура кристалла (для GaN $T_c=1600\text{K}$). Согласно экспериментальным данным температурный коэффициент для светового потока составляет порядка 1-1,5% на каждые 10°C перегрева.

Температурная зависимость выхода излучения из люминофора описывается формулой Мотта [20]:

$$\eta(T) = \frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)} \quad (3.9)$$

где A - константа тушения; E_a - кажущаяся энергия активации тушения люминесценции; η_0 - квантовый выход люминесценции при комнатной температуре.

Таким образом, температурная зависимость светового потока для кристалла с люминофором имеет вид:

$$I(T) \approx I_{300} \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right) \left[\exp(-\rho d) + \exp(-\alpha d) \left(\frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)} \right) \right] \quad (3.10)$$

Тепловой режим кристалла зависит не только от температуры окружающей среды, но и от процессов выделения тепла в его активной области [114, 123, 124]. Кроме того, дополнительное выделение тепла происходит и в люминофорном покрытии кристалла, обусловленными процессами поглощения излучения. В работе была проведена теоретическая оценка температуры покрытия, на примере модели источника света представленной на рисунке 3.8.

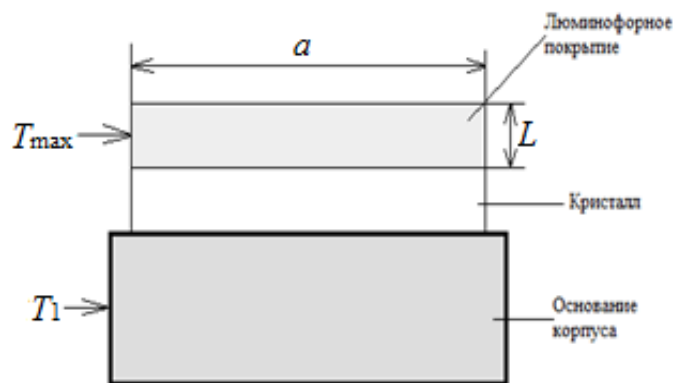


Рисунок 3.8 – Тепловая модель полупроводникового источника света

Оценку температуры люминофорного покрытия возможно провести, используя известное решение уравнения теплопроводности для плоской пластины с равномерно распределенным по её объёму источником тепла.

Примем, что поверхность люминофорного покрытия, контактирующая с кристаллом, имеет постоянную температуру T_1 , Теплообмен с поверхности которой может осуществляться только конвекцией, фактически является теплоизолированной. Таким образом, если пренебречь конвективным

теплоотводом с поверхности покрытия, то математически, установившееся температурное поле в момент времени τ в кристалле будет описываться уравнением теплопроводности Лапласа [35]:

$$\frac{d^2T(x)}{dx^2} + \frac{q_6}{\lambda} = 0 \quad (3.11)$$

где, q_6 - плотность выделяющейся тепловой мощности излучения в единице объёма.

Первое граничное условие имеет простой вид: $T(0)=T_1$.

Второе граничное условие, требующее чтобы поверхность при $x = L$, была теплоизолированной и, следовательно, градиент температуры на ней равен нулю:

$$\left. \frac{dT(x)}{dx} \right|_{x=L} = 0 \quad (3.12)$$

Решение этого уравнения известно [35], распределение температуры по толщине покрытия подчиняется параболическому закону, при этом максимальная температура достигается на поверхности пластины при $x=L$:

$$\frac{T_{\max}}{T_1} = 1 + \frac{q_6 L^2}{2\lambda T_1} \quad (3.13)$$

Количество тепла, выделяемое в объёме люминофорного покрытия толщиной L с характерным размером a в единицу времени, определяется выражением [125]:

$$q_6 = \alpha L a^2 I_0 \exp(-\alpha L) \quad (3.14)$$

где α - коэффициент поглощения; I_0 – световой поток.

Оценим коэффициент теплопроводности люминофорного покрытия, состоящего из кремнийорганического компаунда и порошка иттрий-алюминиевого граната легированного церием. Соотношение компонент по весу 90% кремнийорганики и 10% ИАГ (Ce). Переводя весовые отношения в объёмные,

получим, что объёмная доля компаунда $v_k = 0,975$, а доля люминофора $v_f = 0,0225$. Используем формулу Бургера [126] для теплопроводности смеси, состоящей из связки и сферических частиц:

$$\lambda_{эфф} = \frac{v_k \lambda_k + c v_f \lambda_f}{v_k + c v_f} \quad (3.15)$$

В этой формуле, кроме объёмных долей, введены следующие обозначения: λ_k – теплопроводность компаунда (0,2 Вт/мК), λ_f – теплопроводность ИАГ (13 Вт/мК), $C = \lambda_k/\lambda_f = 0,015$. На рисунке 3.9 представлены результаты расчета температуры покрытия для круглого кристалла диаметром 1 мм, из которых следует, что температура люминофора может существенно превышать температуру кристалла. Это может привести к уменьшению квантовой эффективности люминофора и к изменению соотношения интенсивностей цветов: синего и красно-желтого.

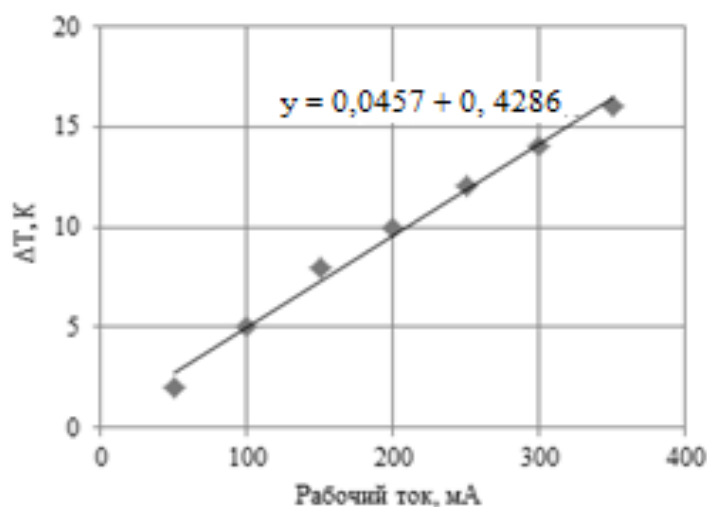


Рисунок 3.9 – Величина среднего перегрева люминофорного покрытия относительно поверхности кристалла, в зависимости от прямого тока

Экспериментальная проверка сделанных предположений проводилась на полупроводниковых источниках света КИПД154А92 [127]. Измерение коррелированной цветовой температуры, а также и величины светового потока, в выделенных светофильтрами диапазонах излучения источника осуществлялась с помощью спектрометра AvaSpec-2048 в диапазоне температур от комнатной до

+100 °С. Контроль температуры проводился, как с помощью термопары, закрепленной на поверхности корпуса источника света, так и бесконтактным методом [114].

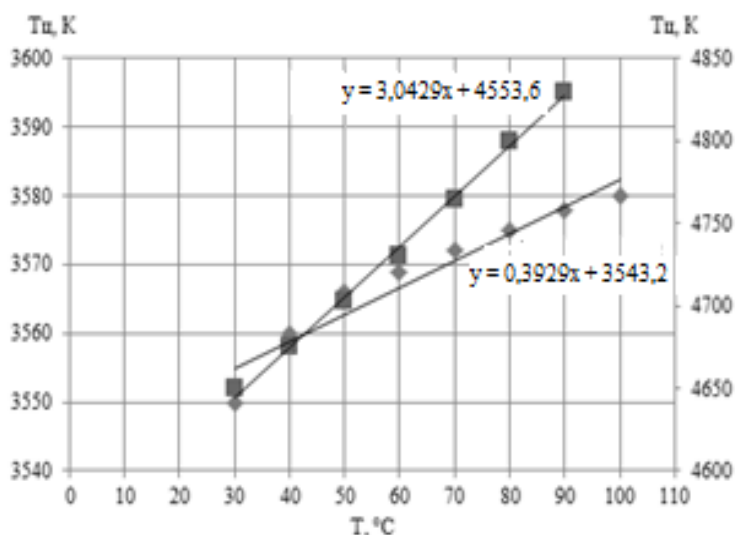


Рисунок 3.10 – Зависимость цветовой температуры полупроводниковых источников света КИПД154А92 от температуры: ■- «теплого света», левая шкала; ◆-«холодного света», правая шкала

В результате проведенных исследований установлено, что коррелированная цветовая температура полупроводниковых источников света имеет сильную зависимость, как от рабочей температуры источника, так и времени его эксплуатации и может быть использована для измерения температуры люминофорного покрытия.

3.4 Исследование теплового режима работы приборных светодиодных ламп ЛПМ 26

Проведенные исследования возможно применить при анализе тепловых полей светотехнических устройств. Полупроводниковые источники света, как правило, эксплуатируются в составе осветительных устройств или модулей. В качестве примера проводились исследования теплового режима светодиодной лампы ЛПМ 26 (АО НИИПП, г. Томск) [113, 128]. Одной из главных проблем при конструировании светодиодных ламп является обеспечение их оптимального теплового режима [124, 129]. Это связано с сильной зависимостью всех параметров

лампы, а в особенности величины светового потока и срока безотказной работы изделия от температуры. Суммарный нагрев лампы обусловлен выделением тепла как в отдельных источниках света, так и в стабилизаторе и балластном сопротивлении. Для обеспечения долговременной работы при заявленных характеристиках приборных светодиодных ламп ЛПМ 26 проводилось исследование их теплового режима работы.

Величина подаваемой электрической мощности достаточно велика и составляет 0,52 Вт. Исходя из паспортных данных и величины рабочего тока, распределение выделяющейся тепловой мощности следующее: 320 мВт на стабилизаторе напряжения *LM317Lz*; 25 мВт на балластном резисторе; 120 мВт на светодиодном модуле. Итого суммарная тепловая мощность составляет 465 мВт, остальная электрическая мощность (55 мВт) излучается в виде света. Все выделяющееся тепло отводится через цоколь и байонет патрона *B10d*, а также поверхность корпуса лампы в окружающую среду.

Исходные данные для теплового расчета методом электротепловой аналогии следующие [124]:

- тепловое сопротивление стабилизатора *LM317Lz* в корпусе *TO-92* составляет 100 °C/Вт;
- тепловое сопротивление балластного резистора на плакированной алюминиевой плате имеет величину 50 °C/Вт;
- тепловое сопротивление светодиодного модуля на основе светодиодов составляет 60 °C/Вт.

Тепловой расчет проведен по методике, описанной в [129]. Общее тепловое сопротивление лампы, размещенной в стандартном патроне типа *B10d* от активной области кристалла (*p-n*-перехода) центрального светодиода до корпуса патрона, при комнатной температуре составляет 75 °C/Вт. Исследования теплового режима лампы проводили в диапазоне температур от комнатной до +100 °C. Измерения температуры кристаллов проводили бесконтактным методом, путем регистрации 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, но в импульсном режиме при длительности импульсов 1 мкс и частоте следования 1000 Гц [114]. Фотометрические измерения проводили с помощью спектрометра AVASpec-2048-USB-2. Результаты измерений представлены на рисунке 3.11.

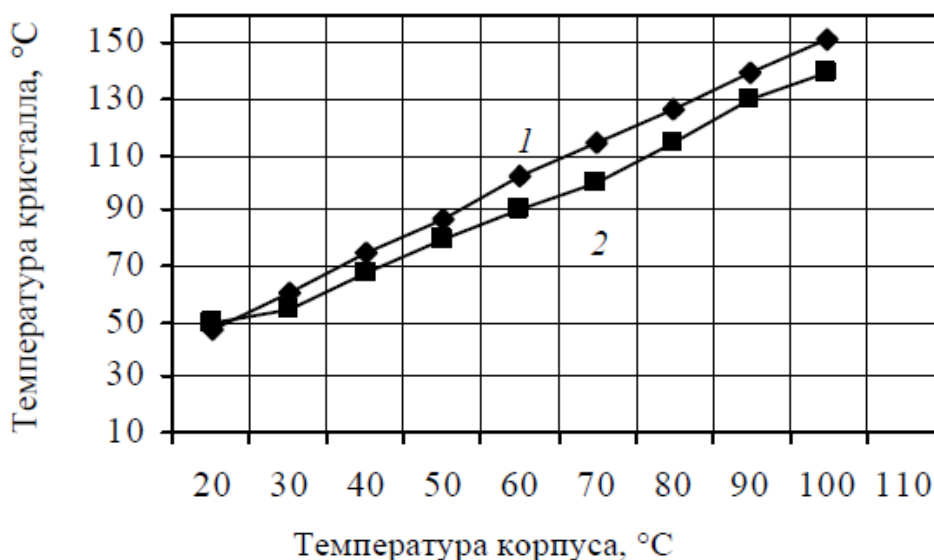


Рисунок 3.11 – Зависимость температуры кристалла от температуры корпуса: 1 - лампа «теплого света»; 2 - лампа «холодного света»

Измерения температуры корпуса стабилизатора проводились контактным способом с помощью термопары. По результатам эксперимента было установлено, что перепад температур кристалл – корпус увеличивается с ростом температуры окружающей среды. Из зависимостей следует, что температура кристалла в светодиодной лампе «теплого» света выше, чем в лампе «холодного» света, что связано с дополнительным выделением тепла в люминофорном покрытии [123]. Увеличение температуры кристалла приводит к снижению светового потока лампы. Это обусловлено несколькими причинами, основной из которых является увеличение температуры нагрева р–n-перехода, связанное с уменьшением в процессе испытаний внутренней и внешней квантовой эффективности и увеличением, за счет этого, выделяющегося в кристалле тепла. Повышение температуры корпуса оказывает влияние на изменение величины не только

внешнего квантового выхода, но и на цветовую температуру лампы в сторону её увеличения.

Так как электропитание светодиодной лампы в транспортном средстве может осуществляться как от аккумулятора, так и от генератора, то напряжение на электродах лампы может изменяться в достаточно широких пределах. Стабилизатор тока на основе *LM317Lz* обеспечивает поддержание тока на светодиодах величиной 20 мА при колебаниях напряжения от 16 до 30 В. При этом тепловая мощность, выделяющаяся в светодиодном модуле, остается постоянной, но изменяется мощность рассеяния на стабилизаторе тока, за счет чего происходит повышение температуры всей конструкции лампы. На рисунке 3.12 представлены полученные экспериментально зависимости температуры кристаллов светодиодов и корпуса лампы от величины питающего напряжения.

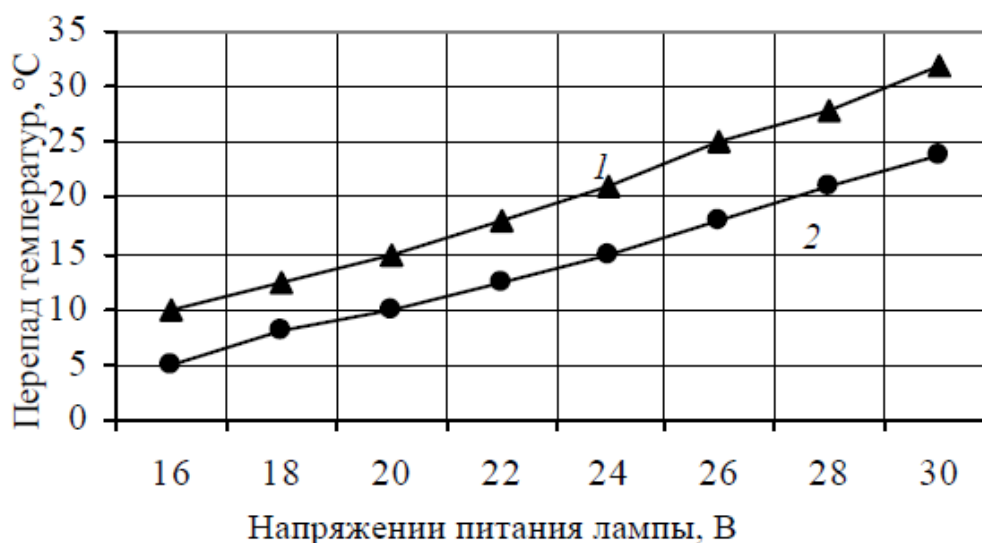


Рисунок 3.12 – Зависимость температуры светодиодов (1) и температуры корпуса (2) от величины питающего напряжения

Из зависимостей следует, что тепловая мощность, выделяющаяся в стабилизаторе тока, оказывает определяющее влияние на тепловой режим светодиодного модуля и при номинальном напряжении 26 В приводит к дополнительному росту его температуры на 15–18 °C.

На рисунке 3.13 представлена измеренная температурная зависимость полуширины пиков кристалла и люминофора [112]. Как правило, при увеличении

температуры спектр излучения уширяется, его максимум сдвигается в сторону низких энергий.

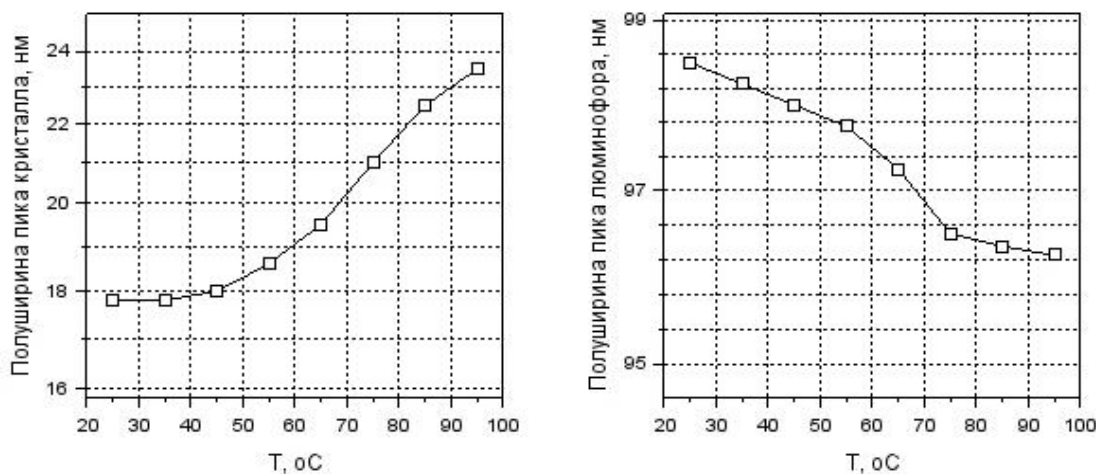


Рисунок 3.13 – Температурная зависимость полуширины спектров излучения кристалла и люминофора лампы ЛПМ26

Таким образом, установлено, что при температуре корпуса лампы ЛПМ 26 равной +60 °С температура кристаллов не превышает предельно допустимого значения +115 °С.

Повышение температуры корпуса лампы в процессе эксплуатации вызывает изменение основных параметров ламп таких как, цветовая температура и интенсивность излучения, что в свою очередь оказывает негативное влияние на коэффициент цветопередачи используемых источников света и их качество.

3.5 Исследование теплового режима работы светодиодных модулей

3.5.1 Расчёт температуры $p-n$ – перехода чипа полупроводникового источника света в конструкции светодиодного модуля

Для предварительной оценки теплового режима были проведены расчеты теплового сопротивления простейшего светодиодного модуля, конструкция которого представлена на рисунке 3.14.

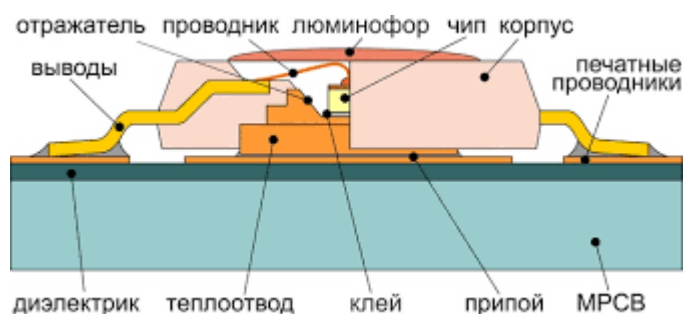


Рисунок 3.14 – Модель элемента светодиодного модуля для теплового расчета

При тепловом расчете на первом этапе была составлена тепловая схема замещения. Схема для осветительного устройства на основе светодиодных модулей корпус которого одновременно является и охладителем для светодиодов представлена на рисунке 3.15.

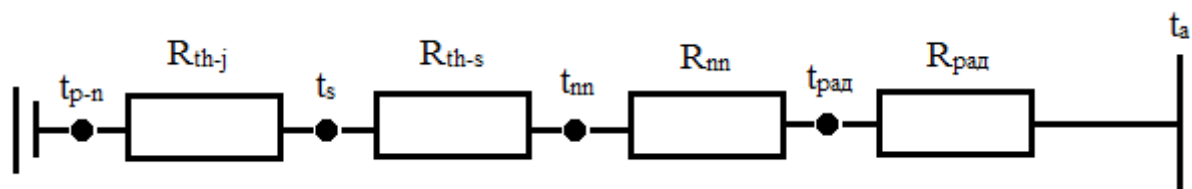


Рисунок 3.15 – Тепловая схема замещения светодиодного модуля

В исследуемых светодиодных модулях используются светодиоды высокой мощности Lighting LUXEON 5050 White. Из *DataSheet* [130] для указанных светодиодов известно тепловое сопротивление «кристалл – корпус» $R_{th-j} = 1,9$ °C/Wm, а также тепловое сопротивление «корпус – точка пайки» $R_{th-s} = 2$ °C/Wm, мощность одного светодиода повышенной мощности составляет $P=3,84$ Wm.

Тепловое сопротивление R_{th} оставшихся участков полупроводникового устройства определяется по формуле:

$$R_{th} = \frac{d}{(\lambda \cdot A)}, \quad (3.16)$$

где d – толщина слоя материала, A – контактная площадь, λ – теплопроводность.

Найдем тепловое сопротивление печатных плат, используемых в работе. Данные печатные платы сделаны по технологии *Metal Core PCB* и состоят из трех слоев:

- 1) диэлектрик ($d = 75$ мкм);
- 2) медная фольга ($d = 35$ мкм);
- 3) алюминиевое основание ($d = 1$ мм).

Таким образом, при расчете суммарного теплового сопротивления печатной платы необходимо рассчитать каждый слой и в последующем выполнить сложение результатов.

Проведем расчет теплового сопротивления диэлектрического слоя:

$$R_{\text{диэл}} = \frac{d}{(\lambda \cdot A)} = \frac{0,0075}{(0,22 \cdot 65,61)} = 5,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{°C}}{\text{Вт}}. \quad (3.17)$$

Далее произведём расчет теплового сопротивления медной фольги, с учетом того, что площадь медных дорожек занимает приблизительно пятую часть площади всей платы:

$$R_{\text{меди}} = \frac{d}{(\lambda \cdot A)} = \frac{0,0035}{(4 \cdot 13,12)} = 6,67 \cdot 10^{-5} \frac{\text{°C}}{\text{Вт}}. \quad (3.18)$$

Следующим этапом является расчет теплового сопротивления алюминиевого слоя.

$$R_3 = \frac{d}{(\lambda \cdot A)} = \frac{0,1}{(0,03 \cdot 65,61)} = 5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{°C}}{\text{Вт}}. \quad (3.19)$$

Рассчитаем суммарное сопротивление печатной платы:

$$R_{\text{платы}} = R_{th_{Cu}} + R_{th_{oxide}} + R_{th_{Al}} = 6,67 \cdot 10^{-5} + 5,2 \cdot 10^{-4} + \\ + 5 \cdot 10^{-2} = 0,05 \frac{\text{°C}}{\text{Вт}}. \quad (3.20)$$

Далее рассчитываем тепловое сопротивление слоя теплопроводящей пасты КПТ-8:

$$R_{\text{пасты}} = \frac{d}{(\lambda \cdot A)} = \frac{0,01}{(0,008 \cdot 65,61)} = 19 \cdot 10^{-3} \frac{\text{°C}}{\text{Вт}}. \quad (3.21)$$

Рассчитываем тепловое сопротивление радиатора:

$$R_{\text{радиатор}} = \frac{d}{(\lambda \cdot A)} = \frac{0,4}{(1,92 \cdot 360)} = 5,8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{°C}}{\text{Вт}}. \quad (3.22)$$

Итоговым действием в подсчете общего теплового сопротивления является алгебраическая сумма всех ранее известных.

$$\begin{aligned} R_{\Sigma} &= R_{th-j} + R_{th-s} + R_{\text{платы}} + R_{\text{пасты}} + R_{\text{радиатор}} \\ &= 2 + 1,9 + 5 \cdot 10^{-2} + 19 \cdot 10^{-3} + 5,8 \cdot 10^{-4} = 3,97 \frac{\text{°C}}{\text{Вт}}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Температура р-п перехода в общем случае определяется тремя параметрами [131]:

- 1) температурой окружающей среды;
- 2) суммарным тепловым сопротивлением теплотвода;
- 3) рассеиваемой электрической мощностью светодиода.

Формула для вычисления температуры р-п перехода:

$$t_{p-n} = t_a + R_{\Sigma} \cdot P, \quad (3.24)$$

где t_a – температура окружающей среды, °С; R_{Σ} – суммарное тепловое сопротивление «кристалл – окружающая среда», °С/Вт; P – мощность одного светодиода, Вт.

Учитывая, что максимальная рабочая температура окружающей среды, заданная техническими характеристиками устройства составляет $t_a=60^{\circ}\text{C}$, то температура р-п перехода составит:

$$t_{p-n} = 60 + 3,97 \cdot 3,84 = 75,24^{\circ}\text{C}. \quad (3.25)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что при использовании светодиода *Lighting LUXEON 5050 White* в составе исследуемых светодиодных модулей температура р-п перехода не поднимается выше $t_{p-n} = 76^{\circ}\text{C}$ при максимально допустимой температуре р-п перехода $t_{p-n} = 120^{\circ}\text{C}$.

3.5.2 Экспериментальное исследование теплового режима полупроводниковых источников света в составе светодиодного модуля

Исследования теплового режима проводились на светодиодном модуле *TRN-STD28-LX5050-1402_RoHS* размещенном на вертикальном радиаторе (см. рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – Внешний вид исследуемого светодиодного модуля осветительного устройства

На рисунке 3.17 приведена тепловизионная картина распределения поверхности модуля в момент включения электропитания. В работе исследовались две конструкции модулей: без защиты поверхности и с защитой с помощью прозрачного компаунда.

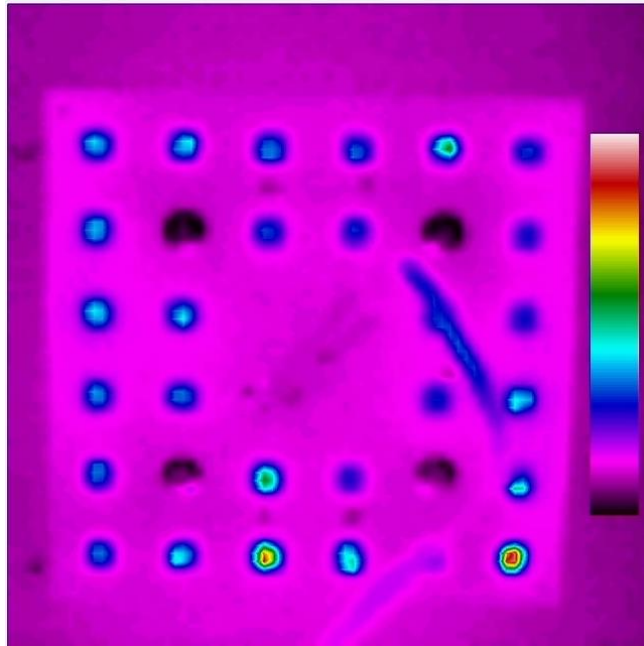


Рисунок 3.17 – Тепловизионная картина поверхности модуля без компаунда в момент включения электропитания

На рисунке 3.18 приведена тепловизионная картина распределения температуры на поверхности модуля после двух часов работы.

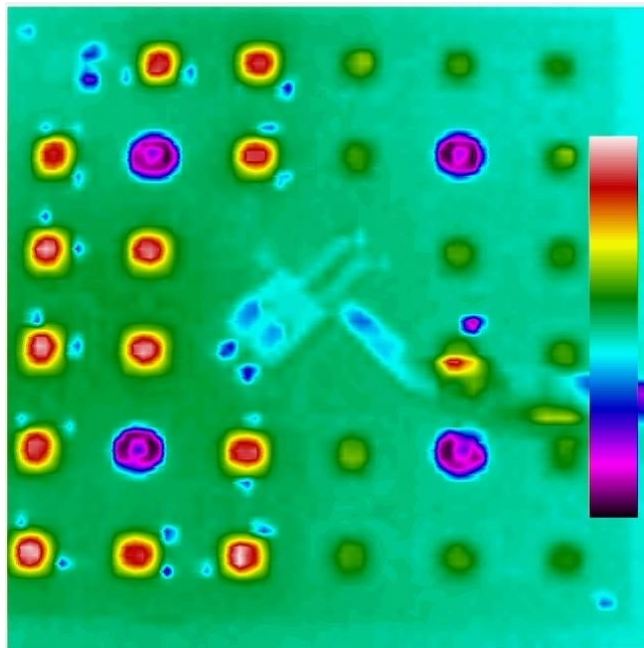


Рисунок 3.18 – Тепловизионная картина поверхности модуля после двух часов работы

Помимо тепловизора контроль температуры при работе светодиодного модуля осуществлялся закрепленной на центральной части его поверхности термопарой. На рисунке 3.19 приведены результаты измерения температуры

поверхности светодиодного модуля без компаунда с использованием тепловизора и термопары при его непрерывной работе.

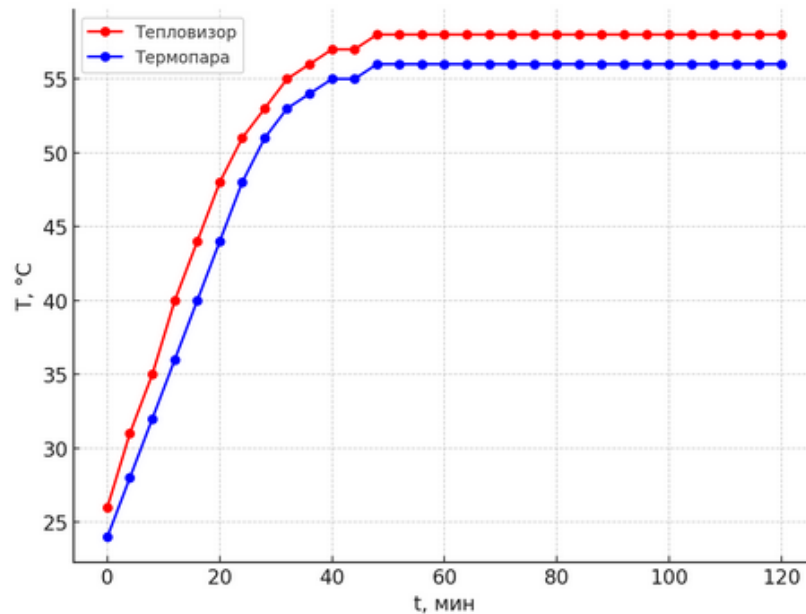


Рисунок 3.19 – График изменения температуры поверхности модуля без компаунда от времени работы: 1 – термопара; 2 – тепловизор

Проведенные измерения температуры показывают, что время выхода модуля на постоянную температуру составляет порядка 60 минут, причем значения температур, измеренные тем и другим методом отличаются друг от друга на величину не более 5 С. На рисунке 3.20 представлены тепловизионные картины распределения температуры по поверхности модуля с прозрачным компаундом в момент включения электропитания.

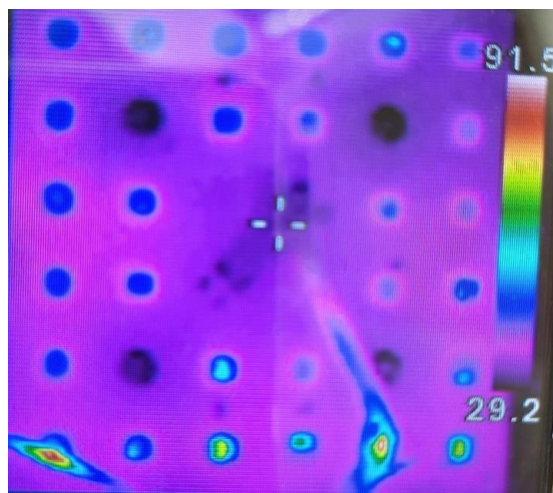


Рисунок 3.20 – Распределение температуры поверхности модуля с компаундом в момент включения электропитания

На рисунке 3.21 приведена тепловизионная картина поверхности светодиодного модуля, покрытого компаундом, после двух часов работы.

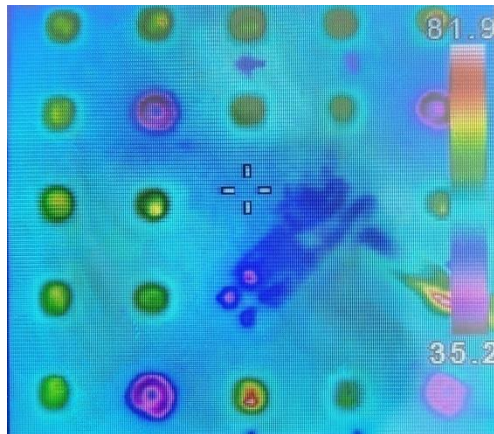


Рисунок 3.21 – Распределение температуры по поверхности модуля с компаундом через два часа работы

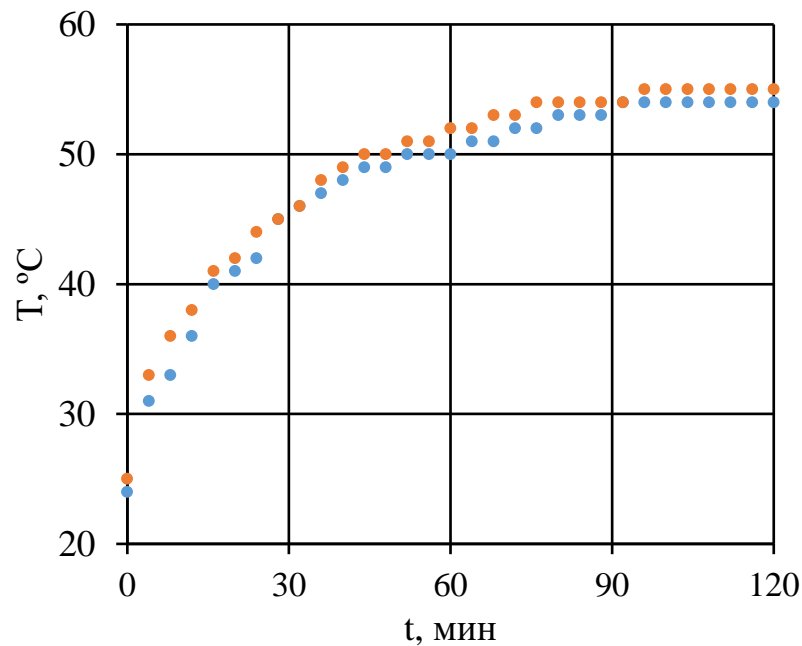


Рисунок 3.22 – График изменения температуры поверхности модуля, покрытого компаундом, от времени работы: 1 – термопара; 2 – тепловизор

Исследования показали, что время установления температуры модуля, поверхность которого покрыта компаундом, больше в 1,5 раза чем без компаунда. Это обусловлено ухудшением конвективного теплообмена поверхности светодиодного модуля с окружающей средой. Кроме того, в результате исследований были выявлены температурные градиенты на поверхности

светодиодных модулей. Достоверную оценку температуры отдельно взятого кристалла светодиода исследуемого модуля возможно только с использованием разработанного спектрального метода контроля температуры. Для этого были проведены измерения зависимости полуширины пика излучения кристалла светодиода от времени работы модуля (рисунок 3.23).

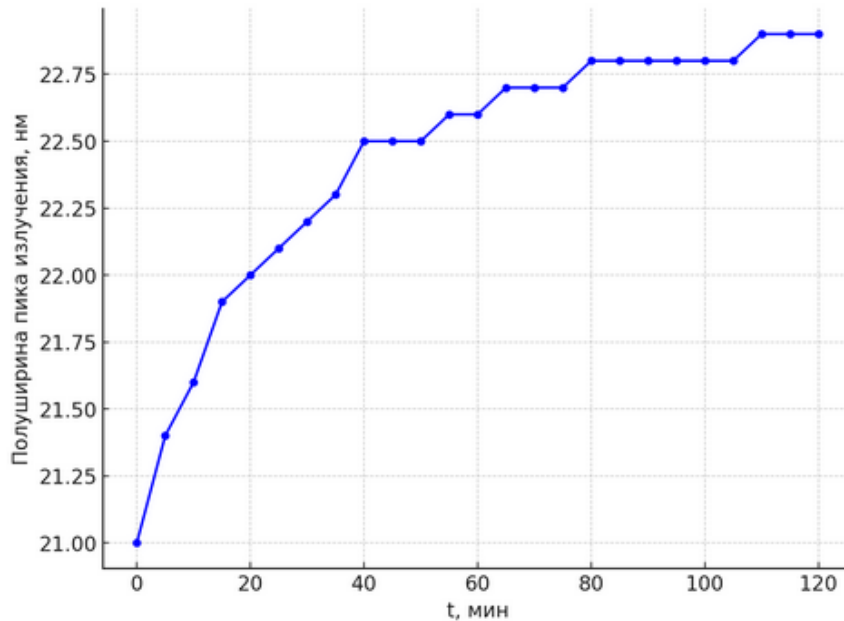


Рисунок 3.23 – Зависимость полуширины пика излучения отдельного чипа светодиодного модуля от времени

Значения полуширины пика излучения светодиодного чипа позволили рассчитать температуру его активной области (p-n – перехода). На рисунке 3.24 приведены сравнительные зависимости изменения температуры на поверхности осветительного устройства, полученной с помощью тепловизионного изображения, и температуры активной области светодиода, полученной из спектральных измерений.

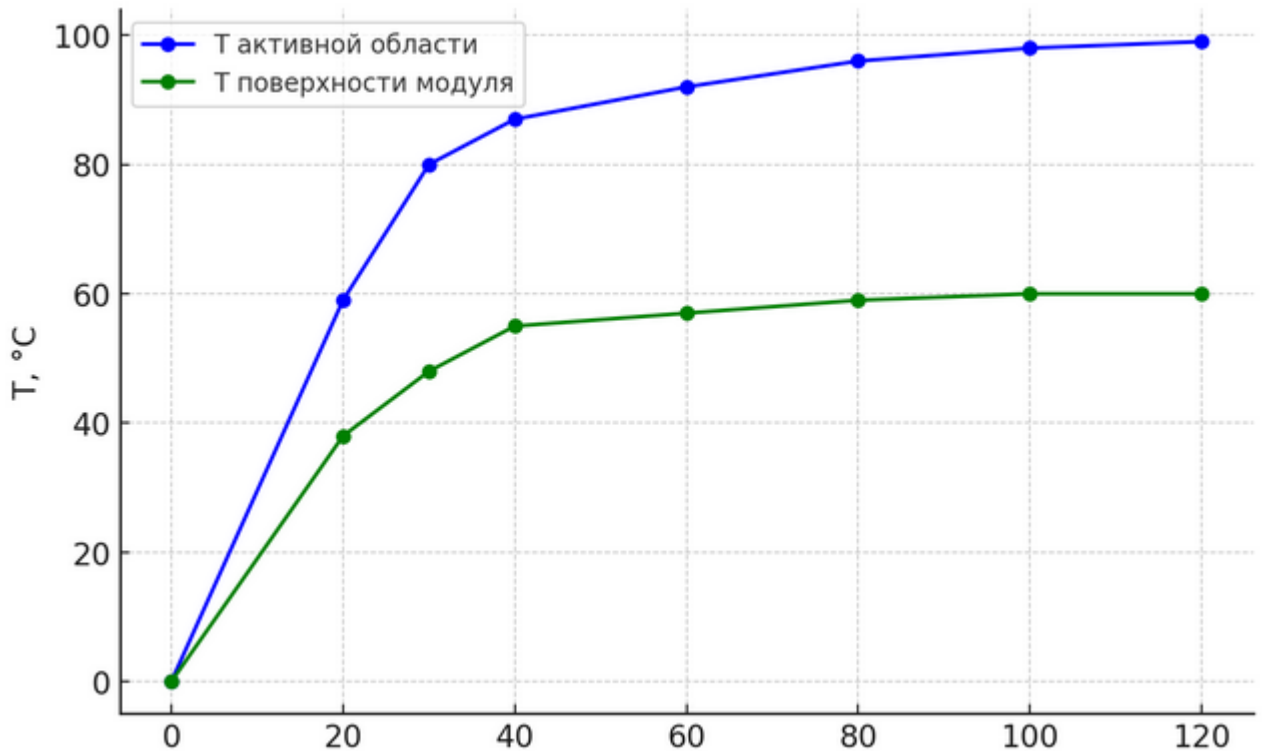


Рисунок 3.24 – Оценки температуры на поверхности осветительного устройства с помощью тепловизионного изображения и из спектральных измерений

Таким образом, температура p - n -переходов полупроводниковых источников света обусловлена внутренним выделением тепла при разогреве активной области гетероструктуры за счет безизлучательной рекомбинации и зависит от эффективности отвода тепла через элементы конструкции как самого источника света, так и осветительного прибора на их основе. При этом температура активной области чипа почти в два раза превышает температуру поверхности модуля.

Определение температуры p - n -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.

3.5.3 Моделирование температурных полей на поверхности светодиодного модуля

Моделирование температурных полей на поверхности светодиодного модуля осуществлялось в программной среде *COMSOL Multiphysics* с использованием трехмерного 3D – моделирования.

Первым шагом являлся выбор требуемого физического интерфейса. Для данной задачи потребуется интерфейс для решения уравнений теплопроводности (*Heat Transfer in Solids*). На рисунке 3.25 представлено окно выбора требуемого для моделирования интерфейса.



Рисунок 3.25 – Интерфейс для решения уравнений теплопроводности

Так как процесс нагрева – это временной процесс, то тип исследования будет зависеть от времени (*Time Dependent*).

Процесс моделирования начинается с построения геометрических моделей всех элементов, которые будут исследоваться или взаимодействовать друг с другом. На рисунке 3.26 приведена графическая модель светодиодного модуля.

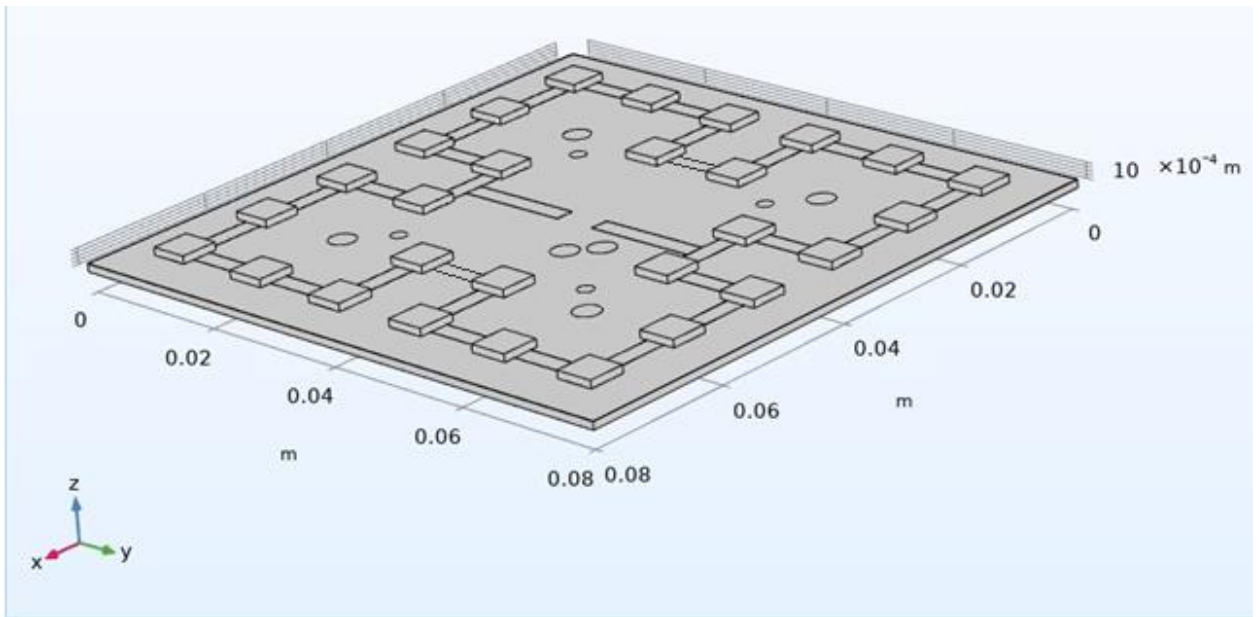


Рисунок 3.26 – Геометрическая модель светодиодного модуля

Далее была создана модель радиатора в плоскости светодиодного модуля (рисунок 3.27).

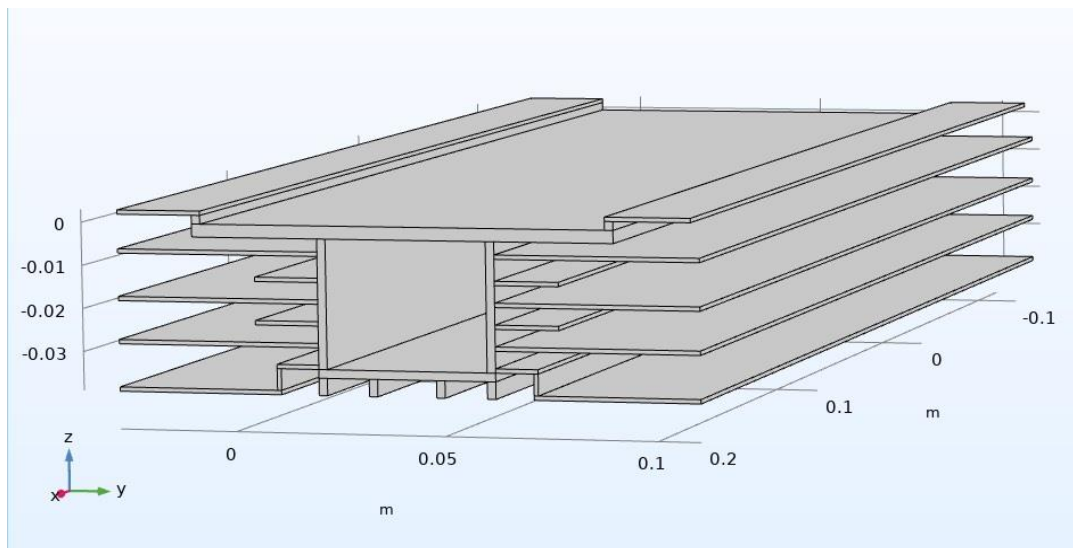


Рисунок 3.27 – Модель радиатора, обеспечивающего тепловой режим светодиодного модуля

На рисунке 3.38 приведен список материалов, использовавшихся при моделировании светодиодного модуля.

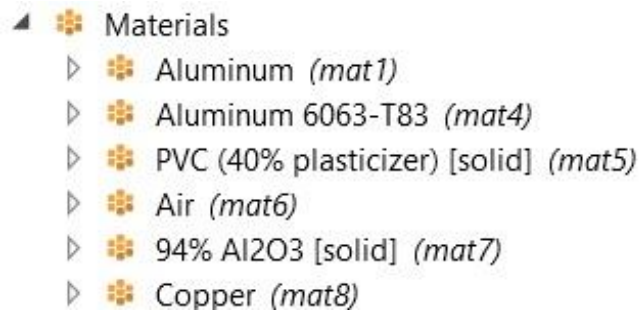


Рисунок 3.28 – Интерфейс списка материалов

В данном списке воздух играет роль пространства, в котором происходит нагрев. Таким образом, задается максимально приближенная к реальному эксперименту задача. Несущая печатная плата состоит из трех слоев:

- 1) Al – металлическое основание;
- 2) Al_2O_3 – диэлектрик;
- 3) Cu – токопроводящие дорожки.

Радиатор целиком выполнен из алюминия марки АД31. В библиотеке материалов *COMSOL Multiphysics* нет марки алюминия АД31, поэтому была выбрана марка Aluminium 6063. Данные марки отличаются коэффициентом теплопроводности, однако в самой программе можно изменять данный коэффициент.

Корпуса светодиодов выполнены из пластмассы. Материал – PVC [132].

В таблице 3.2 представлены значения коэффициентов теплопроводности материалов, использованных при моделировании.

Таблица 3.2 – Теплопроводность материалов для моделирования

Материал	λ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
Алюминий АД31	192
Алюминий	220
Медь	400
PVC	0,01
Al_2O_3	22-25

В данном списке нужно выбрать теплоотводящую поверхность, источник тепла и термический контакт. Номинально светодиоды Lighting LUXEON 5050 имеют мощность $P = 3,84 \text{ Вт}$, но учитывая, что около 60% мощности светодиода уходит в тепло и лишь 40% преобразуется в видимое излучение, в настройках источника тепла мощность была задана как $P = 2,3 \text{ Вт}$.

Между печатной платой и радиатором существует термический контакт, который выполняется из термопасты КПТ-8. В настройках термического контакта также задаются параметры термопасты.

Для решения дифференциальных уравнений теплопроводности, должны быть заданы граничные условия. Для решения этого вопроса требуется построить расчётную сетку. На рисунке 3.29 представлена расчётная сетка.

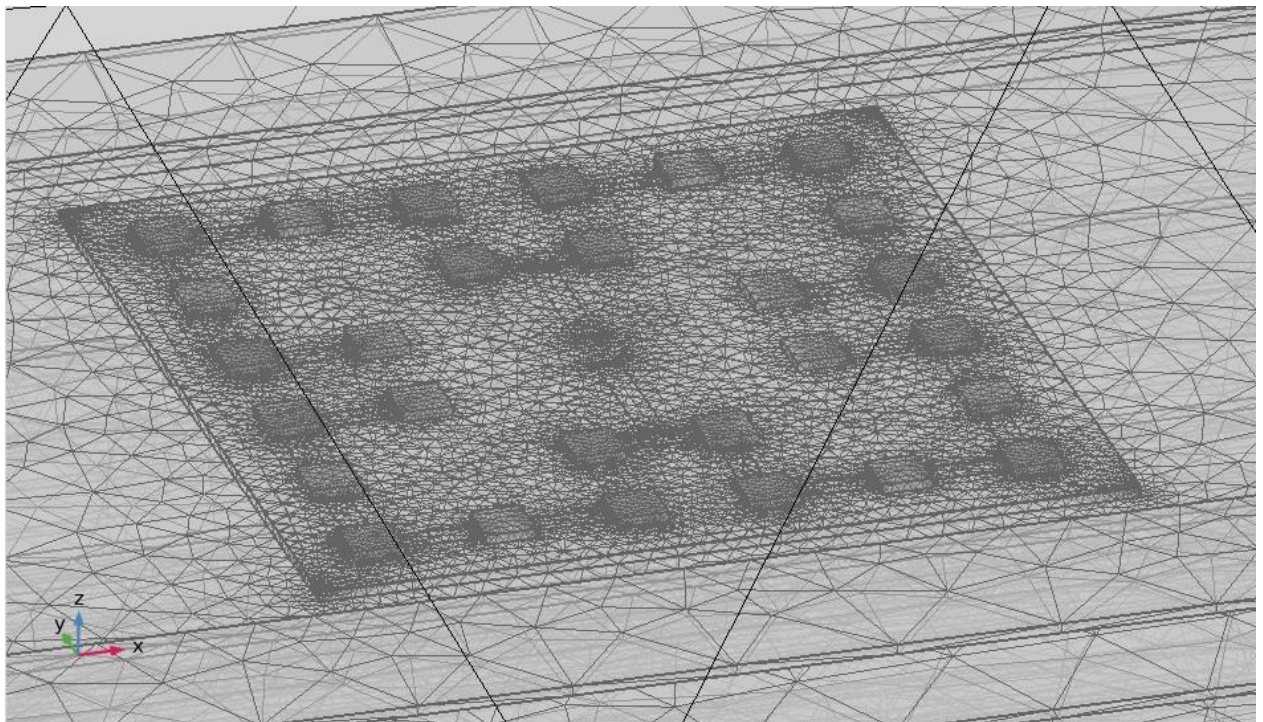


Рисунок 3.29 – Расчётная сетка для решения уравнения теплопроводности

Моделирование проводится во временной области в диапазоне выхода модуля на постоянную температуру (от 0 до 120 минут). Данные фиксировались с интервалом 4 минуты. На рисунке 3.30 представлен результаты моделирования в момент времени $t = 4$ минуты.

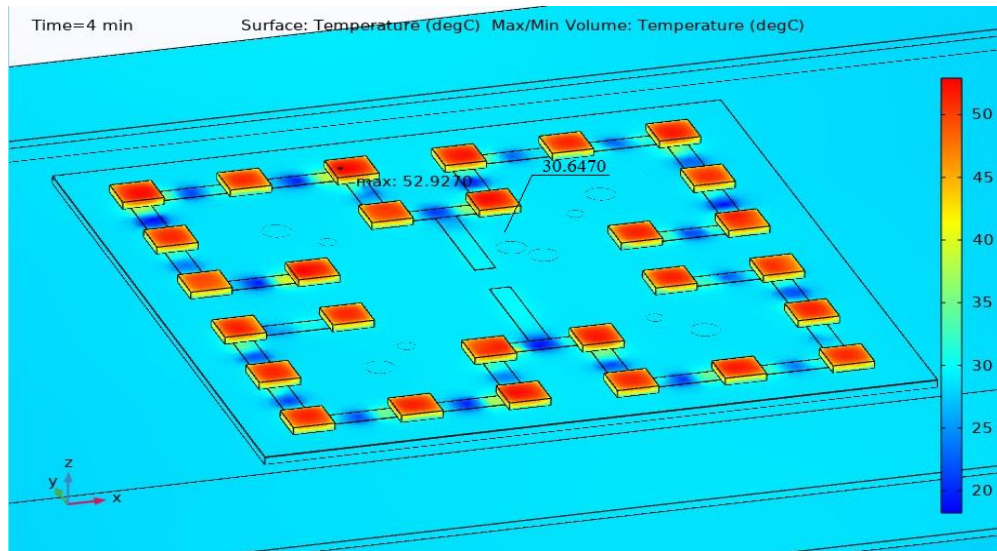


Рисунок 3.30 – Термический расчет в начале эксперимента

На рисунке 3.31 представлены результаты моделирования в момент времени $t = 120$ минуты.

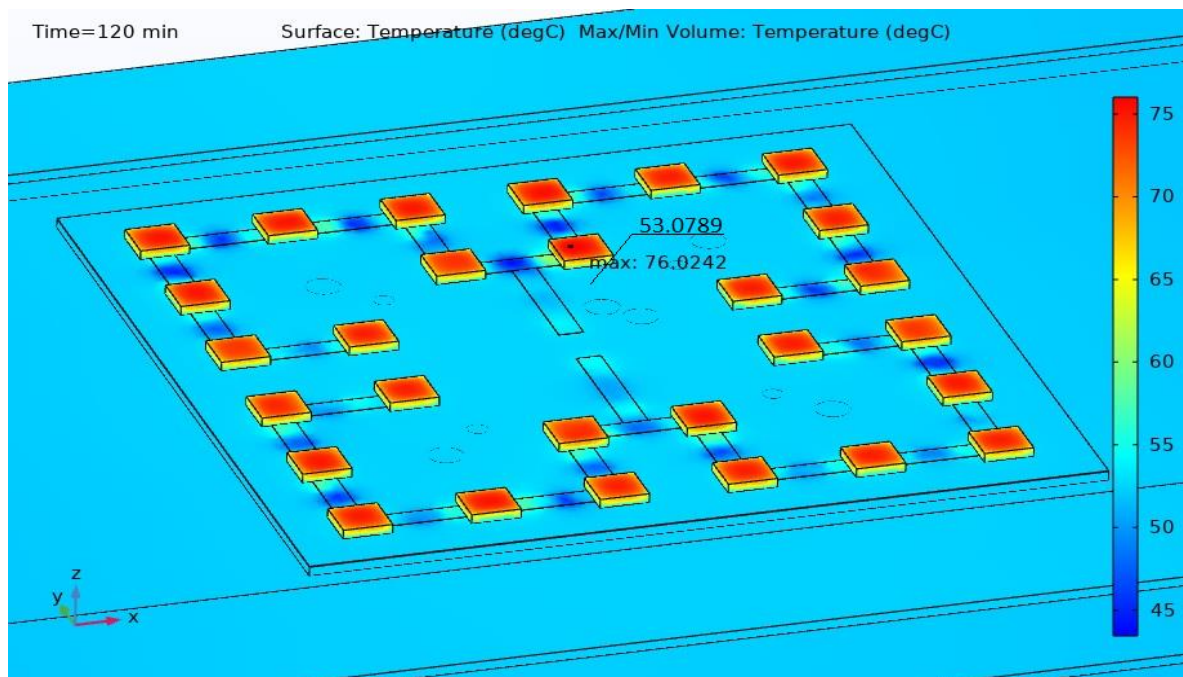


Рисунок 3.31 – Результаты моделирования через 120 минут нагрева светодиодного модуля

Также по изображению, представленному на рисунке 3.31 следует, что температура каждого чипа в процессе длительной работы составила $T = 76^{\circ}\text{C}$, что подтверждает полученные ранее экспериментальные результаты.

3.6 Выводы по разделу 3

Проведенные исследования теплового режима работы осветительных устройств на основе полупроводниковых источников света и их элементов позволил сделать следующие выводы.

Температура $p-n$ – переходов полупроводниковых источников света обусловлена внутренним выделением тепла при разогреве активной области гетероструктуры за счет безизлучательной рекомбинации и зависит от эффективности отвода тепла через элементы конструкции как самого источника света, так и осветительного прибора на их основе.

Определение температуры $p-n$ – 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

Для оценки корректности теплового режим работы полупроводниковых источников света в составе осветительных устройств (лампы и модули) необходима разработка методов оценки температурных полей на поверхности осветительного устройства. Таким методом может выступать термография поверхности осветительного устройства.

4 АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА И ИХ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗ КАРТЫ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В разделе 3 было установлено, что тепловыделение в полупроводниковом источнике света обусловлено разогревом активной области гетероструктуры и зависит от эффективности отвода тепла, который определяется выбранными материалами, конструктивными особенностями осветительного прибора и условиями эксплуатации. При анализе теплового режима работы осветительных устройств особое внимание стоит уделить поиску локальных точек аномального тепловыделения внутри источника освещения. Их своевременное обнаружение предотвращает деградацию материалов, например, люминофора и сохраняет эффективность преобразования излучения, спектральные характеристики излучения и коррелированную цветовую температуру.

С увеличением размеров и сложности современных осветительных приборов возникает проблема контроля их характеристик, включая температуру отдельных полупроводниковых источников света и всего устройства в целом. В связи с этим в данном разделе решается вопрос развития методов оценки температурных полей осветительных устройств с использованием термографии. Этот способ позволяет визуализировать температурные поля полупроводниковых устройств, выявляя зоны перегрева и аномальные точки без вмешательства в конструкцию. Основные результаты исследований, изложенных в данном разделе, приведены в работах [133-145].

4.1 Восстановление распределения температур осветительного устройства

4.1.1 Обоснование применимости тепловизионной съемки для тепловизионного контроля объектов различного размера и площади

В исследовании [146] продемонстрирована возможность бесконтактного контроля в реальном времени, позволяющего осуществлять оперативный

мониторинг температурного состояния оборудования. При этом тепловизионная съёмка обеспечивает мониторинг теплового состояния компонентов без физического вмешательства, что исключает риск повреждения и позволяет диагностировать устройство в процессе работы. Подобная задача рассматривается в работе [147]. Тепловизор применяется для мониторинга устройств в рабочем режиме, позволяя выявлять изменения в тепловом профиле, которые могут указывать на износ или ухудшение состояния компонентов, что способствует своевременному проведению профилактического обслуживания. В том числе тепловизионная съёмка позволяет наблюдать за тепловыми изменениями и выявлять зоны, которые могут не выдержать перегрева, что помогает разработчикам улучшать конструкции для работы в сложных условиях. Такая задача рассматривается в исследовании [148] где проводилось тестирование тепловой нагрузки на компоненты в условиях стресса.

Тепловизоры используются для комплексного контроля, обеспечивая точность диагностики и сокращая вероятность ложных срабатываний. Работа [149] подчеркивает значимость температурного мониторинга для выявления аварийных состояний, демонстрирует пригодность тепловизоров для диагностики сложных и труднодоступных объектов.

Анализ термостабильности полупроводниковых устройств и обнаружение зон перегрева и локальных аномалий с использованием тепловизора подтверждено в статье [150]. При таком способе диагностирования возможно отследить, как устройство реагирует на различные уровни нагрузки в течение длительного времени. Это позволяет оценить, насколько стабилен его тепловой профиль, что важно для долгосрочной надёжности компонентов, особенно в условиях эксплуатации с высокими температурными нагрузками.

На этапах тестирования тепловизионная диагностика выявляет дефекты, возникающие из-за ошибок в сборке и монтаже. Такие дефекты могут включать плохие контакты, неправильно установленные компоненты или избыточное нагревание, которые могут привести к отказу в будущем. Этот подход помогает минимизировать риски на стадии производства, что и показывает проведенное

исследование в работе [151]. Подобный вопрос рассматривается в работе [152] по отношению контролю качества сборки печатных плат Тепловизионная диагностика позволяет оценить равномерность распределения температуры на печатных платах, выявляя потенциальные проблемы, связанные с неравномерной нагрузкой или дефектами компонентов.

Серия работ автора Власова А.Б. и соавторов раскрывает сразу несколько перспективных направлений результативного использования возможностей тепловизора в микроэлектронике. В работе [153] автор демонстрирует перспективность применения тепловизоров для анализа теплофизических параметров материалов. Проведенные исследования подтвердили, эффективность тепловизоров для выявления таких дефектов, как расслоения и пустоты в композитных материалах, используемых в микроэлектронике, поскольку эти дефекты изменяют теплопередачу и проявляются в виде температурных аномалий. Так же автор Власов А.Б. в работе [153] изучает температурное распределение и тепловой поток, полученные с помощью тепловизора и получает оценку эффективности теплопроводящих материалов, что важно при разработке устройств с высокими требованиями к теплоотводу.

Еще одной из задач применения тепловизора может быть оптимизация конструкции для улучшения теплового управления, минимизации тепловых точек напряжения и создания более равномерного теплового профиля устройства. В статье [154] продемонстрированы возможности системы тепловизионной диагностики для анализа различных конструкций, форм и расположения компонентов в корпусе устройства.

Применительно возможности использования тепловизионной съемки к объектам диссертационного исследования в научных работах, указанных ниже, уже изучался. Использованный в исследовании [155] метод инфракрасной тепловизионной микроскопии позволяет напрямую измерять распределение температуры по площади р-п перехода с высоким разрешением ~ 3 мкм при абсолютной погрешности измерения ~ 2 К. Работа [156] подтверждает пригодность тепловизионной съемки для валидации тепловых моделей светодиодов и

демонстрирует её эффективность для диагностики теплового поведения высокоэнергетических светодиодных систем. А вот в статье [157] обосновывается выбор микротермографии для светодиодов большой площади со сложной структурой так как важно знать не только тепловое сопротивление, но и подробное распределение температуры (температурную карту) по активной зоне.

Стоит отметить, что данные полученные с помощью тепловизионной съемки не всегда возможно однозначно интерпретировать, в связи с чем возникает дополнительная задача, связанная с верификацией тепловизионных данных.

4.1.2 Формальная постановка задачи

Для восстановления термодинамического распределения температур разработан алгоритм, представленный ниже. Отметим следующее, что построение пространственного распределения термодинамических температур объекта может осуществляться решением обратной задачи:

$$A_{\xi}^{-1}(T_r(i, j)) = |f_a(i, j)| \quad (4.1)$$

где $f_a(i, j)$ - тепловая томограмма температуропроводности; A_{ξ}^{-1} - обратный оператор, реализующий корректное обратное решение по минимальному значению невязки:

$$A_{\xi}^{-1} \rightarrow \text{argmin} \quad (4.2)$$

В процессе восстановления термодинамического распределения температур используется сетка радиационных температур, обеспечивающая пространственную дискретизацию исследуемой области, представлена на рисунке 4.1

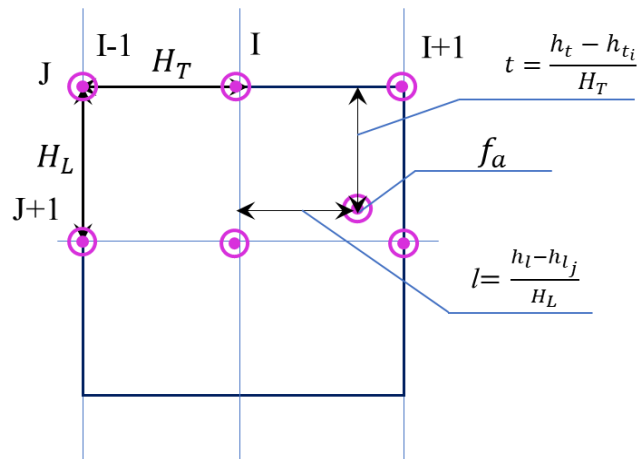


Рисунок 4.1 - Сетка радиационных температур для восстановления температурного поля

Данная сетка представляет собой систему узловых точек, в которых измеряются или вычисляются температурные значения, необходимые для численного решения обратной задачи. Структура сетки включает узлы с дискретными координатами $(I-1, I, I+1; J, J+1)$, что позволяет описывать температурное поле объекта с определённой точностью. Пространственные шаги по вертикальной (H_T) и горизонтальной (H_L) осям определяют разрешающую способность метода, а нормированные параметры t и l используются для интерполяции температурных значений внутри ячеек сетки. В каждом узле вычисляется функция $f_a(i,j)$, представляющая собой тепловую томограмму температуропроводности, которая характеризует особенности теплообмена в данной точке. Физическая интерпретация сетки заключается в представлении температурного распределения в пространстве, что является ключевым этапом при решении обратной задачи. Восстановление температурного поля осуществляется на основе измеренных радиационных температур поверхности объекта, что обеспечивает достоверность вычислений и позволяет корректно определять внутренние источники тепла. Таким образом, сетка радиационных температур формирует основу для численного решения обратной задачи, обеспечивая корректное восстановление температурного распределения внутри исследуемого объекта. В следующем подразделе представлена разработка реализации алгоритма, основанного на минимизации невязки, что позволяет

уточнить параметры температурного поля и повысить точность определения внутренних источников тепла.

4.2 Алгоритм выявления внутренних источников тепла и их температуры из карты тепловизионного контроля технических объектов с внутренними источниками тепла

4.2.1 Описание алгоритма

Разработанный алгоритм позволяет восстанавливать температурное распределение исследуемого объекта, используя тепловизионные изображения и известные теплофизические параметры материалов, которые приведены в таблице 4.1. Алгоритм включает обработку исходных данных, идентификацию зон локального нагрева и численное восстановление температурного поля с последующей оценкой внутренних источников тепла. Ниже приведено пошаговое описание алгоритма и его блок-схема.

Таблица 4.1 - Теплофизические параметры материалов

Теплофизические характеристики материалов	Печатная плата (трехслойная подложка)	ПпИС (полупроводниковый источник света)
Плотность	3900 кг/м ³	6150 кг/м ³
Теплоёмкость	880 Дж/кг·К	490 Дж/кг·К.
Коэффициент теплопроводности	200–237 Вт/м·К	130-200
Источник тепла	3,84 Вт (общая мощность подводимая к источнику)	1,536 (40% мощности приходится на все светодиоды)
Коэффициент теплоотдачи при конвекции (считаем что плата находится в воздушном пространстве)	5 до 25 Вт/м ² ·К (при условии, что воздух перемещается принудительного)	5 до 25 Вт/м ² ·К (при условии, что воздух перемещается принудительного)
Внешняя температура	25°C (298.15 К)	

Исходные данные для алгоритма.

- а) изображение поверхности светодиодного модуля, полученное с помощью тепловизора (теповизионная картина) размером $n \times m$;
- б) максимальное и минимальное температурные значения с изображения T_{min} и T_{max} ;
- в) задаваемое пороговое значение температуры $T_{min} < T_{threshold} < T_{max}$
- г) известные параметры моделируемого объекта: c (теплоёмкость), λ (теплопроводность), k (коэффициент теплоотдачи при конвекции), ρ (плотность);
- д) 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:

$$T_{1[m \times n]} = (T_{1(x_1, y_1)}, T_{1(x_2, y_2)}, \dots, T_{1(x_m, y_n)}) \quad (4.3)$$

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: $\forall x \in X^*, \forall y \in Y^*: T_{((x, y))} \geq T_{threshold}$:

$$\begin{aligned} X^* &= x_1, x_2, \dots, x_{m^*} < m \\ Y^* &= y_1, y_2, \dots, y_{n^*} < n \\ \forall x \in X^* \forall y \in Y^*: T_{(x, y)} &> T_{threshold} \end{aligned} \quad (4.5)$$

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 которых превышает пороговое значение.

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

$$\begin{aligned} X_Q^* &= \left((x_{1_min}, x_{1_max}), (x_{2_min}, x_{2_max}), (x_{q_min}, x_{q_max}) \right) \\ Y_Q^* &= \left((y_{1_min}, y_{1_max}), (y_{2_min}, y_{2_max}), (y_{q_min}, y_{q_max}) \right), \end{aligned} \quad (4.6)$$

имеющих следующие значения температуры:

$$T_Q = \begin{pmatrix} T_{x_{1_min}, y_{1_min}} & \cdots & T_{x_{1_max}, y_{1_max}} \\ & \cdots & \\ T_{x_{q_min}, y_{q_min}} & \cdots & T_{x_{q_max}, y_{q_max}} \end{pmatrix}. \quad (4.7)$$

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 температурная карта поверхности светодиодного модуля:

$$T_{2[m \times n]} = \begin{pmatrix} T_2(x_1 y_1), T_2(x_2 y_2), \cdots \\ T_2(x_m y_n) \end{pmatrix}. \quad (4.8)$$

Решается оптимизационная задача, где набором минимизируемых функций является разность значений поверхностных температур, полученных в модели и с изображения тепловизора (т.е. функция ошибки), при этом рассматривается разность температур для q источников тепла (и их окрестности) и всей поверхности светодиодного модуля:

$$\min(f_w) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |T_{1(x_i y_j)} - T_{2(x_i y_j)}| \cdot \text{для } w = 1 \dots q \quad (4.9)$$

Оптимизация функций осуществляется итеративно, пока не будет выполнено один из критериев остановки (изменение значения функций при проведении очередной итерации меньше заданного порогового значения, выполнено

максимально количество итераций, достигнуто минимальное значение функции (соответствует задаваемому значению 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, СКО).

Кроме того, формируется карта разности исходного и смоделированного изображений (представлено в значениях температур, где наибольшие значения температур соответствуют наибольшей ошибке определения температуры в данной области с использованием модели).

Апробация алгоритма [158] была осуществлена для задачи выявления внутренних источников тепла и их температуры из карты тепловизионного контроля светодиодных модулей с использованием модели подожки и светодиодных модулей (см. рисунок 4.2). При реализации алгоритма использовались:

- численный метод конечных разностей для дискретизации уравнения теплопроводности;
- метод регуляризации для повышения устойчивости решения и снижения влияния шумов в данных.



Рисунок 4.2 – Блок-схема пошагового выполнения процедур алгоритма восстановления температурного поля

4.2.2 Вычислительный эксперимент

Апробация алгоритма была осуществлена для задачи выявления внутренних источников тепла и их температуры из карты тепловизионного контроля светодиодных модулей с использованием модели подожки и светодиодных модулей. Схема вычислительного эксперимента представлена на рисунке 4.3.

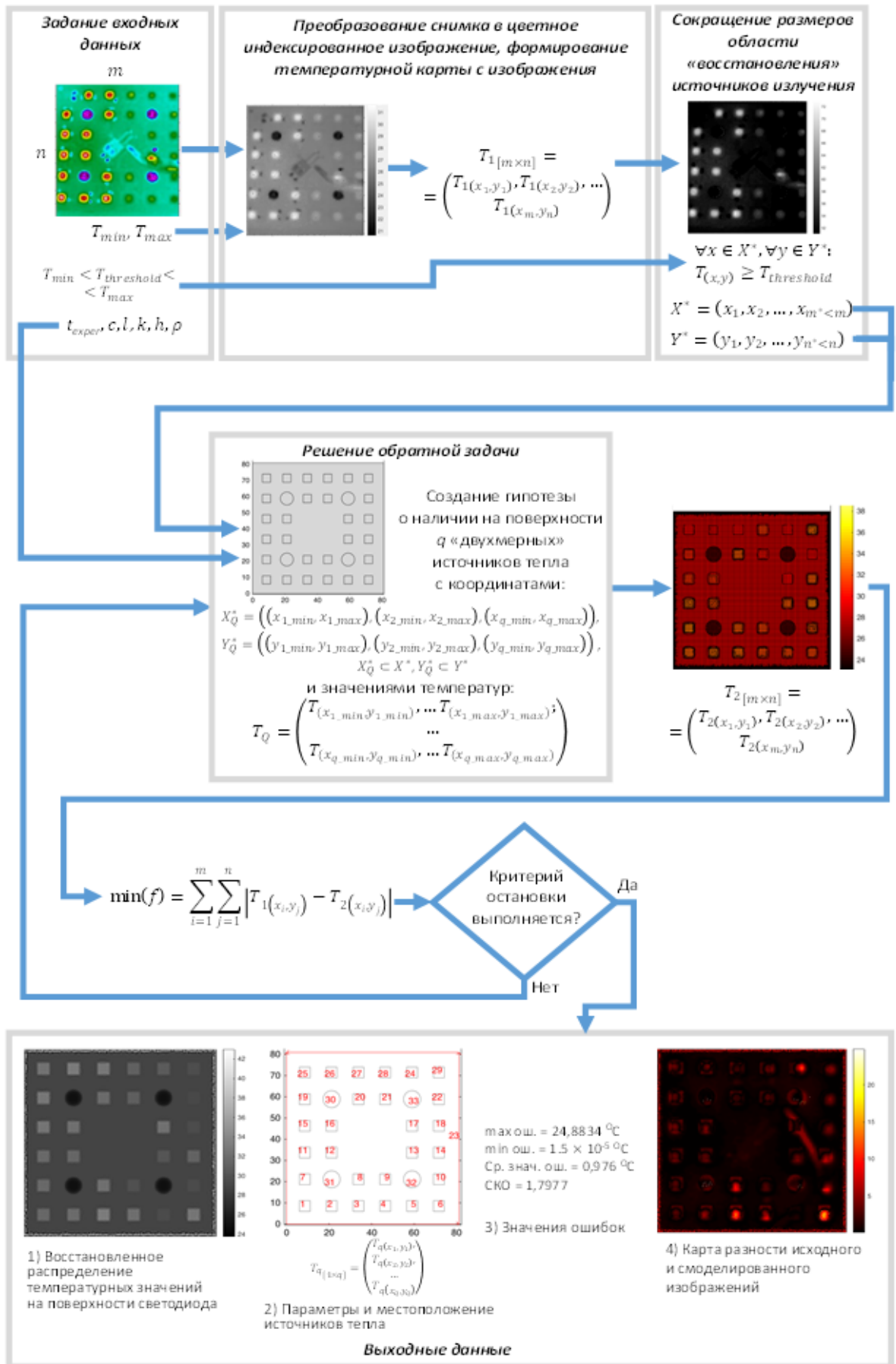


Рисунок 4.3 – Блок-схема вычислительного эксперимента

Статистические и вычислительные характеристики алгоритма, приведены в таблице 4.2

Таблица 4.2 – 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)
макс ошибка	$\pm 25^{\circ}\text{C}$
мин ошибка	$\pm 1,5 \cdot 10^{-6}^{\circ}\text{C}$
средняя ошибка	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
СКО	1,8

На основе проведенной апробации алгоритма и в том числе сравнительного анализа с тепловизионными изображениями и результатами моделирования прямой задачи, можно сделать вывод о том что алгоритм адекватный, работоспособный, ошибка составляет не более $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

В качестве недостатков алгоритма возможно отметить:

- 1) отсутствие реализованной фильтрации входного изображения;
- 2) отсутствие наличия других греющихся элементов (в частности, электрических контактов питания платы и присутствующих элементов электропитания);
- 3) отсутствие нагрева светодиодных модулей в случае их изначальной неработоспособности остается без учета

4.2.3 Сравнительный анализ предложенных решений для выявления внутренних источников тепла и их параметров

Для оценки эффективности разработанного алгоритма проведён сравнительный анализ с существующими решениями выявления внутренних источников тепла. Рассмотрены научные исследования, в которых применяются

различные подходы к восстановлению температурного поля и определению тепловых характеристик объектов. Анализ направлен на выявление преимуществ и ограничений предложенного решения в сравнении с аналогами.

Статья [159] по существу представляет обзор текущих достижений и применяемых технологий для обработки тепловизионных изображений в электрическом оборудовании. Авторы отобрали исследовательские работы по данной тематике, уделяя особое внимание показателям эффективности, используемым методам и достигнутой точности. В работе отражена динамика развития подходов к обработке тепловизионных изображений с 2002 года: от использования простых аналитических методов до внедрения технологий машинного обучения. На основании представленного обзора в данной статье можно выделить необходимую информацию о применимости технологий для решения задач, связанных с анализом тепловизионных данных:

- моделирование тепловых цепей – построение модели тепловой цепи для оценки температуры;
- дискретное вейвлет-преобразование (*DWT*) – выделение признаков тепловых изображений с разными тепловыми режимами работы;
- гистограммный анализ – выявление горячих точек в компонентах электрической сети;
- нормализованная корреляция (*NCC*) – быстрое обнаружение и классификация тепловых дефектов;
- сегментация изображений (например, *Otsu*) - автоматическое выделение областей высокой температуры;
- методы статистического анализа;
- алгоритмы машинного обучения и нейронных сетей – автоматическое выявления дефектов и оценка состояния оборудования;
- анализ текстуры (*GLCM*) – извлечение признаков текстуры из тепловых изображений.

Данная работа показывает, что такая характеристика, как теплота, может быть применима при мониторинге различных физических систем с использованием тепловизора, особенно в энергосистемах. Также определены области дальнейших исследований, направленных на расширение возможностей систем инфракрасной визуализации и связанных с ними технологий.

Авторы в статье [160] выделяют три основные категории алгоритмов решений обратной задачи теплопроводности (*Inverse Heat Conduction Problem IHCP*):

- а) прямые инверсные методы;
- б) наблюдательные методы;
- в) оптимизационные методы.

Основной акцент статьи сделан на разработке оценок характеристик алгоритмов: индексы точности ($eRMS$) и устойчивости (R). На основе этих индексов проведено сравнительное исследование различных методов. По результатам моделирования авторами отмечено:

- методы прямого решения (например, BM , SVD) эффективны при ограниченном объёме данных, но демонстрируют низкую устойчивость к шуму измерений;
- наблюдательные методы (*Observer-Based Methods*) обеспечивают высокую устойчивость благодаря использованию будущих значений данных, однако вводят временные задержки в оценках;
- методы оптимизации (например, CGM) характеризуются высокой точностью и устойчивостью, но требуют значительных вычислительных ресурсов.

Кроме того, в статье предложен подход для улучшения результатов методов с низкой устойчивостью (таких как BM или *Sequential Estimation*), основанный на постобработке данных с использованием фильтров низких частот. Однако для задач с большими объёмами данных или высокой размерностью необходима дальнейшая оптимизация алгоритмов для повышения их эффективности

Обзорные статьи по постобработке тепловизионных изображений свидетельствуют о наличии большого числа методов анализа тепловизионных данных. Однако каждый из этих методов направлен на решение определённой задачи. В связи с этим разработка алгоритмов по реализации методов направлено на решение конкретной задачи. Поэтому сравнение алгоритмов по принятым решениям и/или технологиям возможно лишь по функциональным возможностям, что и будет рассмотрено ниже. Установлено, что для решения обратной задачи теплопроводности, связанной с восстановлением температурного поля и определением внутренних источников тепла, требует применение двух или более методов анализа тепловизионных данных. Например, для более точного восстановления температуры применяются методы устранения шумов, разделения изображений на зоны (сегментация) и решения задач оптимизации. Это обусловлено сложностью физико-математической модели и временными особенностями тепловых процессов.

В статье [161] описывается метод в основу которого лежит трехмерная нестационарная, решающей обратную задачу теплопроводности. При этом теплофизические параметры поверхности оцениваются на основе температурных данных, полученных с противоположной стороны объекта с помощью инфракрасной камеры. Особенность предложенного способа заключается в том, что оценки пространственно-временных изменений теплового потока на поверхности получены решением обратной нелинейной трехмерной нестационарной модели. Решение основано на минимизации функции, представляющей сумму разностей между наблюдениями (измеренные температуры на поверхности) и рассчитанной температурой в той же точке. Однако в сильно нелинейных случаях (например, с температурно-зависимой теплопроводностью) это может потребовать дополнительных итераций и увеличить вычислительную нагрузку. Для фильтрации измерений температуры и сокращения числа оцениваемых компонентов теплового потока используется метод сжатия на основе дискретного косинусного преобразования (*DCT*). Предлагаемая технология в данной статье позволяет вычислить неизвестный

тепловой поток на основе температурных измерений, сделанных на противоположной стороне стенки. Авторы подтверждают правильность численных решений трехмерной модели с помощью сравнения результатов экспериментальных данных. При этом объект для апробирования разработанного метода был взят с простой геометрией (плоская пластина). Для более сложных объектов и форм может потребоваться значительная доработка модели и методов численного решения. Дополнительно, для успешной реализации метода требуется достоверная информация о граничных условиях, таких как коэффициенты теплообмена, свойства материала и температура окружающей среды.

Работа [162] рассматривает разработку подхода по выявлению тепловых аномалий в центрах обработки данных. Подход основывается на использовании метода *Thermal Anomaly-aware Resource Allocation (TARA)*, который включает прогнозирование и анализ температурных карт на основе данных о нагрузке, температуре, воздушных потоках и параметрах системы охлаждения. Тепловые карты анализируются статистическими методами, включая гистограммный анализ, что позволяет характеризовать и классифицировать отклонения по интенсивности и распределению. Таким образом, в качестве результата выступают найденные «горячие» и «холодные» точки, без необходимости восстановления внутреннего распределения температурного поля. Для этого наблюдаемые тепловые карты, полученные с помощью инфракрасной съемки, сравниваются с модельными тепловыми картами, построенными на базе модели теплового дисбаланса. Ключевые преимущества такого подхода: высокая точность обнаружения тепловых аномалий, адаптивность и масштабируемость. Однако он имеет и ограничения, такие как сложность настройки модели, калибровки сенсоров, а также высокие вычислительные затраты на обработку данных в реальном времени и зависимость от точности сенсорных измерений, что может вызывать ложные срабатывания.

Исследование [163] направлено на комплексное использование методов коэффициентов чувствительности и регуляризации Тихонова с целью обнаружения горячих точек в электронных устройствах, таких как микросхемы и корпуса

компонентов. Данный подход позволяет точно определить суммарное тепловыделение и его распределение в пределах горячих точек по температурным данным, не создавая полной карты внутреннего теплового распределения. Стабильность такого решения обеспечивается благодаря регуляризации Тихонова. При этом он ограничен в возможности четкого разделения соседних тепловых источников из-за накладывающихся тепловых полей. Кроме того, расчет коэффициентов чувствительности требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при анализе крупных и сложных объектов. Аналогично в статье [164] метод Тихонова, но при этом сделан акцент на проблеме подбора параметра регуляризации для решения обратных задач теплопроводности. В работе автором подчеркивается, что оптимальный параметр регуляризации подбирается для баланса между точностью и устойчивостью, что позволяет адаптировать метод к «чистым» и «шумным» данным. Приведенный численный эксперимент на основе простой модели пластины подтверждает эффективность предлагаемого подхода, т.е. снижается погрешности в расчетах теплового потока даже при наличии значительных измерительных шумов. Несмотря на простоту реализации, данный подход требует индивидуальной настройки параметра регуляризации и применим только к задачам с простой геометрией.

В работе [165] изложен методический подход, который позволяет определить параметры тепловых характеристик, таких как мощность и распределение источников тепла, на основе температурных данных, полученных в фиксированных точках контроля. Предполагается, что температурные данные могут быть собраны из точек контроля или получены экспериментально, но источник этих данных (например, тепловизионная съемка, термопары и т.д.) не указывается. Подход фокусируется на минимизации температурной невязки между модельными расчетами и заданными температурными условиями, что достигается с помощью оптимизации параметров в задаче теплопроводности. В том числе в работе сделан акцент на этапах метода, список приведен ниже,

– Формулирование экстремальной постановки задачи, минимизирующей температурную невязку между модельными и экспериментальными значениями.

- Ограничение идентифицируемых параметров до физически обоснованного множества функций.
- Преобразование обратных задач теплопроводности в задачу полубесконечной оптимизации для поиска оптимальных значений параметров.
- Применение альтернативных свойств для нахождения параметров, обеспечивающих минимальную невязку.

Данный подход позволяет получать решение с использованием ограниченного числа контрольных точек, что снижает объем данных, необходимых для идентификации тепловых параметров. Обеспечивает достаточную точность без необходимости применения сложных численных алгоритмов. Однако ограниченная точность при малом числе параметров (для повышения точности требуется больше параметров, что усложняет численные расчеты). Метод требует, чтобы функции принадлежали классу непрерывных и непрерывно-дифференцируемых, что может ограничивать его применимость для некоторых числа приложений.

В статье [166] описан подход по применению методов решения обратных задач теплопроводности и разработке абсолютно нового алгоритма по реконструкции изображений в системах электрической емкостной томографии (*ECT*). Основные компоненты алгоритма: дискретизация уравнений методом конечного объема (*Finite Volume Method, FVM*) для создания сетки, подходящей для сложных геометрий; применение методов сопряженного градиента (*Conjugate Gradient Method, CGM*) и алгоритма Левенберга-Марквардта (*LMA*) для обеспечения сходимости при реконструкции изображений. Под реконструкцией изображения в контексте данной статьи авторы понимают воссоздание внутренней структуры или распределения свойств объекта (например, проводимости или теплопроводности) на основе внешних измерений, таких как емкость или температура. По сути, это создание карты внутренних характеристик объекта на основе косвенных измерений, так как входные данные для алгоритма это данные, собранные с поверхности объекта. Алгоритм позволяет точно определять форму и

границы внутренних объектов, основываясь на нескольких итерациях. Это достигается за счет использования методов сопряженного градиента и Левенберга-Марквардта для оптимизации решения. При этом алгоритм может испытывать трудности при реконструкции объектов с острыми углами. И он зависит от начальных предположений о форме и положении внутреннего объекта. Так как это решение обратной задачи, оно подвержено влиянию погрешностей измерений, т.е. требуется регуляризация для повышения устойчивости к шуму, что может снижать точность при использовании слишком сильной регуляризации.

В статье [167] авторы представляют подход к обработке и анализу термографических данных для повышения эффективности неразрушающего контроля. Основное внимание уделяется задачам сегментации, сжатия и реконструкции термографических последовательностей с целью уменьшения объема данных, ускорения их обработки и сохранения ключевой информации для анализа дефектов и тепловых процессов. Совместное использование методов подгонки (*TSR*) и сегментации снижает влияние шумов, что делает алгоритм пригодным для обработки данных низкого качества. Авторами заявлено улучшение скорости вычислений в сотни раз по сравнению с существующими методами и может применяться для быстрого и точного анализа термографических изображений в условиях реального времени. Однако данный алгоритм ориентирован исключительно на анализ поверхностных термографических данных без учета применения физико-математической модели теплопередачи. Это ограничивает его применение для восстановления внутренних температурных полей или тепловых потоков.

Схожий подход, как в предыдущей статье, но уже в виде методологии, предлагается авторами [168]. Описанная методология направлена на автоматизацию анализа термографических изображений для диагностики электрического оборудования. Основное внимание уделяется обработке поверхностных температурных данных без учета процессов теплопередачи. Однако она может служить вспомогательным инструментом для предварительной обработки данных в задачах теплопередачи, например, для определения граничных

условий или локализации источников тепла. Применяются методы сегментации и статистического анализа, такие как расчет гистограмм, контраста и максимальных температур, что позволяет выделять области с аномальными температурами и классифицировать их. Также вводится сопоставление температурных характеристик с эталонными значениями для определения состояния оборудования и идентификации дефектов: Это ускоряет диагностику, снижает влияние человеческого фактора и минимизирует субъективные ошибки. Преимущества такой методологии включают высокую скорость анализа, универсальность для различных типов оборудования и снижение затрат за счет автоматизации. Однако её применение может быть ограничено в случае объектов сложной формы.

В статье [169] предлагается итерационный алгоритм, который анализирует тепловизионные изображения, выявляет аномальные зоны и определяет их координаты. Алгоритм работает с матрицами весовых коэффициентов, которые помогают локализовать аномальную зону («цель») на изображении и снизить ошибки, возникающие из-за ложных срабатываний. Алгоритм снижает влияние ложных срабатываний, использует «весовые коэффициенты» для оценки вероятности принадлежности пикселя к аномалии. Предлагаемый алгоритм обеспечивает высокую точность определения координат тепловых аномалий и снижение числа ложных срабатываний за счет итерационного уточнения расчетов. Кроме того, он может быть интегрирован в системы мониторинга тепловых сетей и способен обрабатывать данные в реальном времени, что делает его подходящим для оперативного анализа. Однако эффективность алгоритма во многом зависит от качества исходных данных и параметров гистограммного анализа, в том числе он работает только лишь с данными без учета внутреннего распределения температур.

Ниже представлена таблица 4.3, содержащая обобщённый сравнительный анализ различных решений (методов/алгоритмов) выявления внутренних источников тепла на основе ключевых характеристик, таких как вычислительная сложность и функциональные возможности.

Таблица 4.3 – Сравнительный анализ решений выявления внутренних источников тепла

Метод / Алгоритм	Определение температуры	Выявление тепловых дефектов	Обнаружение горячих точек	Оптимизация расчётов	Способность корректно локализовать источники тепла	Вычислительная сложность
1	2	3	4	5	6	7
Метод тепловых цепей	Да	Частично	Частично	Нет	Частично	Средняя
Дискретное вейвлет-преобразование (DWT)	Нет	Да	Да	Нет	Нет	Низкая
Гистограммный анализ	Частично	Да	Да	Нет	Нет	Средняя
Нормализованная корреляция (NCC)	Частично	Да	Да	Да	Частично	Средняя
Сегментация изображений (Otsu)	Частично	Да	Да	Нет	Частично	Средняя
Методы статистического анализа	Частично	Да	Частично	Частично	Частично	Средняя
Алгоритмы машинного обучения	Да	Да	Да	Да	Частично	Высокая
Анализ текстуры (GLCM)	Частично	Частично	Частично	Частично	Частично	Средняя
Прямые инверсные методы (BM, SVD)	Да	Нет	Нет	Нет	Да	Средняя
Наблюдательные методы	Да	Частично	Частично	Частично	Да	Высокая
Методы оптимизации (CGM)	Да	Да	Да	Да	Да	Высокая
Обратные задачи теплопроводности (3D модели)	Да	Да	Да	Частично	Да	Очень высокая
Фильтрация и устранение шумов (DCT)	Нет	Нет	Частично	Да	Частично	Средняя
Метод коэффициентов чувствительности	Да	Да	Частично	Частично	Да	Высокая

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6	7
Регуляризация Тихонова	Да	Частично	Частично	Да	Частично	Высокая
Минимаксная оптимизация	Частично	Частично	Нет	Частично	Частично	Высокая
Реконструкция изображений (ECT)	Частично	Да	Да	Частично	Частично	Высокая
Термографический анализ (TARA)	Частично	Да	Да	Да	Частично	Высокая
Авторский алгоритм	Да	Да	Да	Да	Да	Средняя

Результаты сравнительного анализа демонстрируют, что разработанный алгоритм объединяет преимущества различных методов, обеспечивая оптимальное соотношение между точностью, вычислительными затратами и возможностью автоматизированного анализа тепловизионных данных.

4.3 Применение разработанного алгоритма для задач экологического мониторинга

Современные методы экологического мониторинга требуют точных и автоматизированных инструментов для оценки изменений в температурных режимах природных объектов. Разработанный алгоритм, изначально предназначенный для выявления внутренних источников тепла, обладает потенциалом для анализа тепловых аномалий в экологических системах. В данном подразделе рассмотрены подходы к его адаптации для решения таких задач, ключевые моменты изложены в работах [142-144].

4.3.1 Адаптация разработанного алгоритма для выявления внутренних источников тепла в задачах экологического мониторинга

Адаптация алгоритма восстановления температурного поля для экологических задач — это не просто техническое уточнение, а комплексное расширение модели, охватывающее:

- изменение свойств материалов и среды,
- учёт более сложных граничных условий,
- интеграцию данных тепловизионного мониторинга,

- использование многослойной объемной структуры,
- адаптацию к временной изменчивости.

Эти изменения позволяют применить алгоритм, изначально разработанный для анализа теплового распределения в светодиодах, к задачам экологического мониторинга почвы, где требуются более сложные модели для описания тепловых процессов. Подстройка алгоритма в основном заключается в уточнении математической модели теплопередачи. Стоит отметить несколько ключевых аспектов, которые требуют значительных изменений в модели.

1) Изменение параметров теплопередачи.

Алгоритм можно адаптировать к различным типам объектов, используя изменение параметров и граничных условий в уравнении теплопередачи:

$$\begin{aligned} [c(x, y, z)p(x, y, z)] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \\ = \nabla(\lambda(x, y, z)\nabla T(x, y, z, t)) + s(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Для адаптации к различным областям можно изменять параметры:

- $c(x, y, z, u)$, $\rho(x, y, z, u)$ и $\lambda(x, y, z, u)$ — зависят от типа материала и среды, которые могут быть специфичными для природных объектов (вода, почва) или промышленных объектов (металлы, строительные материалы).
- $s(x, y, z, t)$ может представлять источник тепла или загрязнения, локализованный в пространстве и времени, что позволяет моделировать выбросы загрязняющих веществ, утечки или утраты тепла.

В экологических задачах источники загрязнений или тепла могут быть распределены неравномерно и изменяться во времени. Для моделирования подобных процессов можно использовать временно-пространственное распределение мощности источников:

$$s(x, y, z, t) = \sum_{k=1}^q s_k(t)\delta(x - x_k, y - y_k, z - z_k) \quad (4.10)$$

2) Учет новых граничных условий:

Алгоритм можно адаптировать к разным условиям окружающей среды, изменяя граничные условия и параметры среды (температура воздуха, солнечная радиация, скорость ветра и влажность). Эти условия должны быть точно заданы и изменяться в зависимости от климатических и погодных условий, чтобы правильно моделировать теплообмен на поверхности почвы.

Данные тепловизионного мониторинга (например, с БПЛА) представляют температурное распределение на поверхности почвы и служат граничным условием для алгоритма.

$$(x, y, z, t) = U_{\text{поверхность}}(t) \quad (4.11)$$

где $U_{\text{поверхность}}(t)$ — температурный профиль поверхности, который может изменяться из-за погодных условий, загрязнений или солнечной радиации.

3) Оптимизация и критерий невязки для специфичных задач.

Критерий невязки и методы оптимизации также требуют адаптации, чтобы они могли акцентировать внимание на аномалиях, которые представляют интерес в экологии, таких как зоны загрязнений или участки с измененной влажностью. Это требует модификации функционала невязки, чтобы алгоритм мог выявлять именно те тепловые аномалии, которые могут быть экологически значимыми.

$$J(s) = \int (T_{\text{mod}}(x, y, z, t, s) - T_{\text{surf}}(x, y, t))^2 dx dy dz \quad (4.12)$$

4) Учёт временной динамики.

Температурные процессы объектов исследования для экологических задач могут быть подвержены значительным суточным и сезонным колебаниям. Это требует учета временной динамики и адаптации временного шага модели, чтобы точно моделировать влияние времени суток и климатических условий.

Разработанный подход представляет собой комплекс решений для изучения и мониторинг техногенных объектов. На первом этапе выявляются потенциально опасные зоны с тепловыми аномалиями с использованием тепловых данных. На втором этапе проводится детализированная идентификация и классификация

объектов с использованием мультиспектральных технологий. Этот процесс позволяет точно и эффективно обнаруживать, идентифицировать и управлять техногенными объектами, предотвращая их негативное воздействие на окружающую среду и инфраструктуру.

4.3.2 Этап 1. Выявление тепловых аномалий

Дистанционное зондирование поверхности с помощью БПЛА позволяет оценить влажность почвы. Полученная информация позволяет получить распределение влажности почвы как по поверхности, так и на глубине в несколько метров. Дистанционное зондирование влажности почвы проводится с использованием данных в видимом, инфракрасном (ближнем и тепловом) диапазонах и микроволновом.

Основная задача - локализация тепловых аномалий с помощью БПЛА в неоднородной ортотропной среде (почве), применяя метод теплового инфракрасного излучения. Для этого на БПЛА установлена инфракрасная камера.

Определение значений температуры в анизотропной переменнно-насыщенной пористой среде с разрывными коэффициентами в условиях теплообмена на границе среды и окружающей среды проводится путем решения краевой задачи для уравнения конвекции-диффузии, представленной в формуле 4.9. При этом $T = T(x, y, z, \tau)$ - неизвестная температурная функция, $\tau \in [\tau_0, \tau_1]$,

Граничные условия с учетом уравнения теплового баланса и перехода слоистой среды можно было бы представить следующим образом:

На поверхности $z = 0$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h \left(T_{air}(t) - T_{surf}(x, y, t) \right) + B_0 \quad (4.13)$$

где h — коэффициент теплообмена между почвой и воздухом, а B_0 — плотность излучения верхнего слоя почвы.

На глубине $z=N$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (4.14)$$

Это условие предполагает отсутствие теплового потока через нижнюю границу области анализа.

Таким образом формируется тепловая томограмма.

4.3.3 Компьютерное моделирование распределения температурных полей поверхности

Процесс моделирования был начат с учета процесса суточной динамики. Солнечная радиация влияет на суточные колебания температуры как на поверхности земли, так и в ее глубине (см. рисунок 4.4а и 4.4б). Точность выполненного расчёта подтверждается экспериментальными данными (относительная погрешность менее 10 %), что указывает на соответствие использованной математической модели.

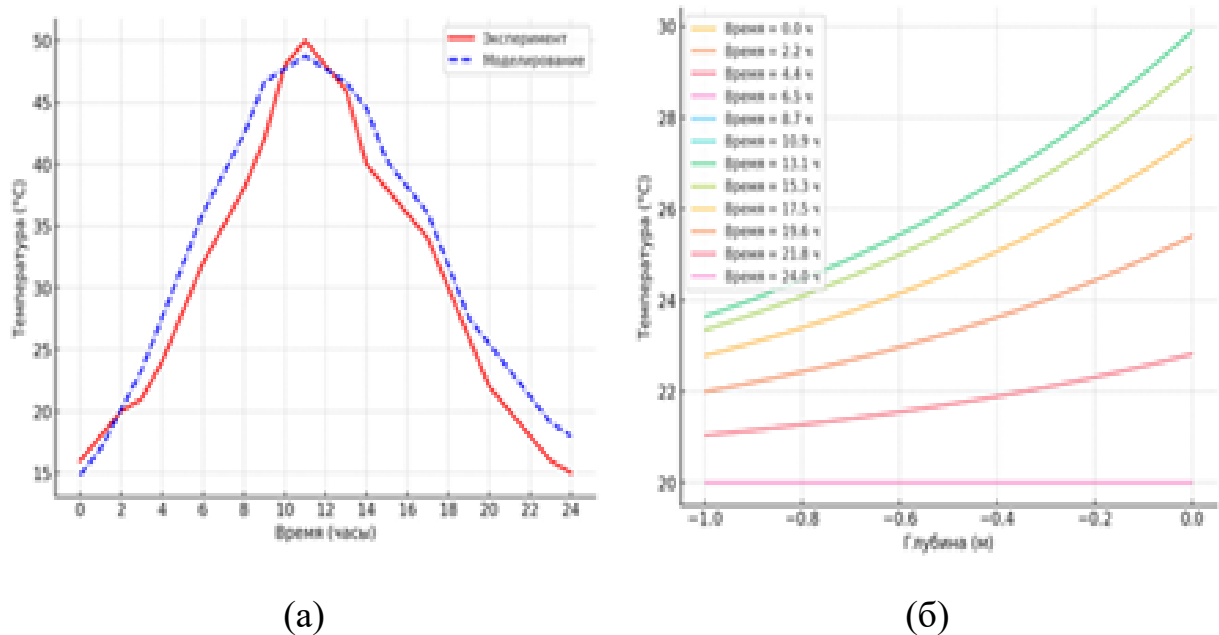


Рисунок 4.4 - Распределение температурного поля на поверхности земли в течении суток (а); Распределение температурного поля в глубину земли (б)

В результате моделирования строится термограмма — распределение температур на поверхности и в глубине почвы (см. рисунок 4.5). Обнаруженные тепловые аномалии интерпретируются как потенциальные техногенные объекты, например, утечки тепла или зоны загрязнения. Далее производится идентификация

и классификация объектов с использованием мультиспектральных данных, полученных с БПЛА.

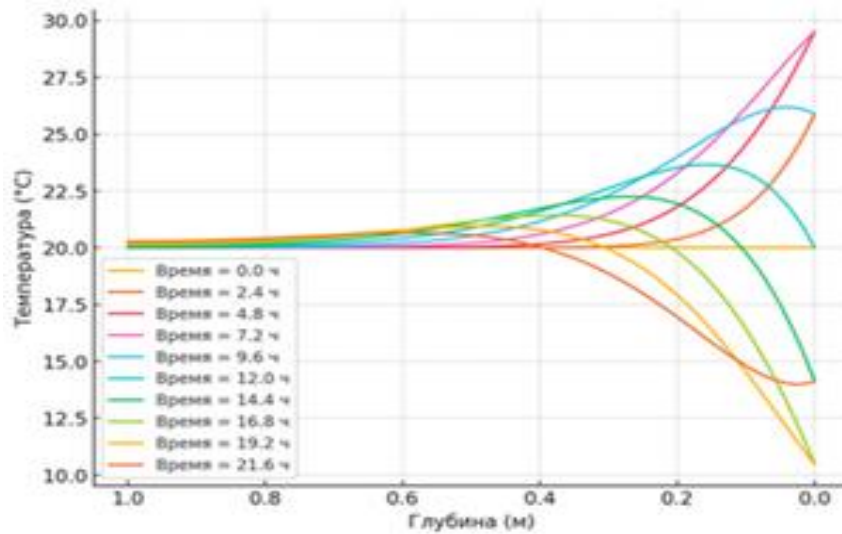


Рисунок 4.5 – Восстановленное распределение температурного поля в глубину земли

Решение позволяет моделировать ежедневный приток солнечного тепла на поверхность земли и оптимизировать распределение температуры с использованием данных, собранных с БПЛА. Результаты расчетов внутрисуточных изменений температуры на поверхности подтвердились экспериментальными данными с погрешностью менее 10%, что говорит о высокой точности модели.

4.3.4 Этап 2. Классификация объектов

Для классификации наземных объектов используются три степени детализации видеоданных: обнаружение, распознавание и идентификация. Этот трехуровневый процесс, является вероятностным. После обнаружения, распознавания и идентификации объектов их можно классифицировать (сгруппировать) по различным критериям.

Постановка задачи. Разница в физических и химических свойствах материалов влияет на их отражательную способность ИК-излучения и поглощающую способность. Это позволяет формировать карту распределения лучистой температуры, связывая конкретный цвет и каждый пиксель изображения с определенным значением температуры. Цифровые данные представлены в виде

двумерных изображений в ИК-диапазоне. Эти изображения можно представить, как массивы лучистой температуры $T(i, j)$, каждое из их значений представляет интенсивность излучения, принимаемого датчиком от единственного элемента поверхности, которому соответствует один пиксель изображения (см. таблицу 4.4).

Таблица 4.4 – Двумерная матричная структура цифрового изображения.

$T(1,1)$	$T(1,2)$...	$T(m,1)$
$T(1,2)$	$T(2,2)$		$T(m,2)$
...			...
$T(1,n)$	$T(2,n)$...	$T(m,n)$

Изображение состоит из $n * m$ пикселей, каждый пиксель имеет координаты (i, j) - номер строки и номер столбца. Дистанционное наблюдение БПЛА с помощью ИК-детектора позволяет получать определенные значения лучистой температуры на поверхности местности. Соответственно, формализованная постановка задачи по обнаружению, распознаванию и идентификации объектов по данным многоспектрального воздушного наблюдения с БПЛА выглядит следующим образом:

$$\hat{U} = U(\hat{\omega}, \hat{\omega}') \quad (4.15)$$

где \hat{U} - массив оценок отношения пикселя мультиспектрального изображения к тому же классу материалов, из которых состоят техногенные объекты или фон;

U - решающая функция, основанная на проверке различий для набора классов;

$\hat{\omega}, \hat{\omega}'$ - классы материалов в ИК и видимом диапазонах.

Предполагая, что каждый пиксель изображения может принадлежать к классу ω (для диапазона длин волн инфракрасного излучения) и классу ω' (для

диапазона длин волн видимого диапазона), правило принятия решения U имеет смысл:

Если расположение класса материала (объекта) на изображении видимого диапазона и двумерном изображении распределения теплопроводности имеет значение ниже порогового уровня ($\hat{\omega} < k_{thres}$), а математическая модель упрощенной среды (одномерная анизотропная среда (θ) = $\lambda = const$: $C_p \frac{dt}{dt} = \lambda \frac{d^2T}{dz^2}$ с граничным условием $\lambda \frac{dT}{dz} - B^0 = q_E$), тогда верно уравнение $\hat{U} = \hat{\omega}$.

Принятие решения. Если справедливо неравенство $\hat{\omega} \geq k_{thres}$, то используется упрощенная математическая модель многослойной (ортотропной) среды. Гипотеза о существовании скрытого подземного объекта под верхним слоем почвы должна быть принята, и может быть два исхода:

- подземный объект относится к классу материалов «теплоизолятор»;
- объект недр относится к классу материалов «теплопроводник».

Таким образом, предложен подход, который может быть использован при подготовке и проведении многоспектральной аэрофотосъемки местности с использованием БПЛА. Учитываются параметры оптимальной высоты полета и разрешения камеры. Это делает обнаружение, распознавание и идентификацию объектов мониторинга эффективными. Применение алгоритма классификации (кластеризации) данных на основе полученной карты радиационной температуры позволяет делать выводы о составе материалов объектов мониторинга.

4.4 Выводы по разделу 4

В ходе исследования разработан алгоритм выявления внутренних источников тепла и восстановления температурного поля на основе тепловизионных данных. Этот алгоритм позволяет анализировать распределение температуры внутри технических объектов, определять локальные зоны перегрева и восстанавливать параметры внутренних источников тепла с высокой точностью. Проведенная апробация показала, что погрешность восстановления температурных

параметров не превышает $\pm 1^\circ\text{C}$, а численные эксперименты подтвердили его работоспособность.

Предложенный алгоритм был адаптирован для решения задач экологического мониторинга. В процессе адаптации были учтены особенности теплопередачи в неоднородных средах, скорректированы граничные условия и с учетом временной динамики, что повысило точность восстановления температурного распределения в природных объектах. Использование данных тепловизионного мониторинга с БПЛА в качестве исходных данных для работы алгоритма позволило идентифицировать зоны утечек тепла и других тепловых аномалий. Таким образом, применение адаптированного алгоритма полагается перспективным для задач экологического контроля.

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:

$$I(t) = I_{300} \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right) \left(\frac{\eta_0}{1+A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)}\right).$$

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. Составлена методика расчета температуры р-п перехода светодиодов в световом приборе, необходимая для определения их режимов работы и с учётом температурных полей светового прибора. Методика не требует построения сложной модели р-п перехода светодиода, и позволяет быстро, не теряя точности, оценивать температуру р-п перехода для создания эффективного теплоотвода.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Берг, А., Дин, П. Светодиоды / пер. с англ. А. Э. Юнович. – М.: Мир, 1979. – 687 с.
- 2 SimuLED [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.strsoft.com/products/SimuLED/>.
- 3 Юнович, А. Э. Свет из гетеропереходов // Световод. – 2011. – 26 с.
- 4 Коган, Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие светодиоды. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
- 5 Бугров, В. Е., Виноградова, К. А. Оптоэлектроника светодиодов: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – 174 с.
- 6 Вилисов, А., Дохтуров, В., Солдаткин, В., Тепляков, К. Индикаторные светодиоды для поверхностного монтажа // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 5(13). – С. 50-58.
- 7 Афонин, К. Н., Иванов, А. А., Солдаткин, В. С., Туев, В. И., Хомяков, А. Ю. Оценка влияния теплопроводности клеевого слоя на температуру светодиодных кристаллов // Оптико-электронные приборы и системы. – 2021. – № 4. – С. 45-52. – URL: <https://1-e-journal.com/...>
- 8 Курбатов, Л. Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазона спектра. – М.: Физмат, 2013. – 400 с.
- 9 Марков, Л. К., Смирнова, И. П., Павлюченко, А. С. и др. Сравнение свойств светодиодных кристаллов AlGaIn вертикальной и флип-чип конструкции с использованием кремния в качестве платы-носителя // Физика и техника полупроводников. – 2013 – № 3. – С. 386–391.
- 10 Юшин, А. М. Современные светодиоды. – М.: Радиософт, 2013. – 384 с.
- 11 Оокоси, Т. Оптоэлектроника и оптическая связь / пер. с яп. А. А. Генина. – М.: Мир, 1988. – 95 с.
- 12 Windisch, R. Light-emitting diodes with 31% external quantum efficiency by outcoupling of lateral waveguide modes // Applied Physics Letters. – 1999.– Vol. 74, No. 16. – P. 2256–2258.

- 13 Ланин, В., Петухов, И., Барбачук, Д. Технологические особенности монтажа flip-chip // Силовая электроника. – 2010. – № 4. – С. 78–82.
- 14 Schnitzer, I. 30% external quantum efficiency from surface textured, thin-film light-emitting diodes // Applied Physics Letters. – Vol. 63, No. 16. – P. 2174–2176.
- 15 Бекирев, У., Бабенко, С., Крюков, В., Потапов, Б., Скипер, А. Светодиод на основе многопроходной тонкопленочной гетероструктуры // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2014. – Спецвыпуск. – С. 137–140.
- 16 Светодиоды Lumileds [Электронный ресурс]. – URL: <https://led-e.ru/svetodiody/svetodiody-lumileds>
- 17 Narendran, N., Maliyagoda, N., Deng, L., Pysar, R. Characterizing LEDs for general illumination applications: mixed-color and phosphor-based white sources // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4445. – P. 137–147. – DOI: 10.1117/12.450037.
- 18 Патент № 2392695 С1 Российская Федерация, МПК H01L 33/06, H01L 33/30. Светодиод белого свечения на основе нитрида элементов III группы : № 2009115181/28 : заявл. 22.09.2006 : опубл. 20.06.2010.
- 19 Cho, J., Park, J. H., Kim, J. K., Schubert, E. F. White light-emitting diodes: History, progress, and future // Laser & Photonics Reviews. – 2017. – Vol. 11, No. 2. – P. 1600147. – DOI: 10.1002/lpor.201600147.
- 20 Шуберт, Ф. Е. Светодиоды. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
- 21 Wu, H., Narendran, N., Gu, Y., Bierman, A. Improving the performance of mixed-color white LED systems by using scattered photon extraction technique // SPIE Optical Engineering + Applications. – 2007. – DOI: 10.1117/12.738332.
- 22 Etafo, N. O., Rodríguez Garcia, C. E., Fraga Almanza, J. L., Oliva Uc, J. Phosphors oxide materials for white light emitting diodes: a short review // Revista Ciencia y Tecnología. – 2021. – Т. 7, № 19. – С. 6–11. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/352038896>
- 23 Soh, M. Y., Teo, T. H., Ng, W. X., Yeo, K. S. Review of High Efficiency Integrated LED Lighting // IEEE PEDS 2017, Honolulu, USA, 12–15 December 2017. – IEEE, 2017. – DOI: 10.1109/PEDS.2017.8289162

- 24 Оптоэлектроника светодиодов [Электронный ресурс]: сайт компании Optogan. – URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1320.pdf>
- 25 Мальцев, А., Мальцев, И. Контроль качества и надежности светодиодов по тепловому сопротивлению p-n-переход – корпус // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 2. – С. 40–41.
- 26 Барбасова, Т. А., Вставская, Е. В., Константинов, В. И., Волков, В. О. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – № 2. – С. 48–51.
- 27 Время электроники [Электронный ресурс]. – URL: <https://russianelectronics.ru/effektivnye-resheniya-dlya-teplootvoda-v-svetodiodnoj-svetotehnike/>.
- 28 Yung, K. C., Liam, H., Choi, H. S. Heat transfer analysis of a high-brightness LED array on PCB under different placement configurations // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 53. – P. 79–86.
- 29 Завьялов, Д. Светодиодная арифметика: качественный теплоотвод = долговечность светильника + высокая энергоэффективность // Полупроводниковая светотехника. – 2017. – № 3. – С. 10–11. – DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.02.014
- 30 Николаенко, Т. Ю., Николаенко, Ю. Е. Новые схемно-технические решения для теплового конструирования люстр со светодиодами // Светотехника. – 2015. – № 2. – С. 48–50.
- 31 Закгейм, А. Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья // Светотехника. – 2012. – № 6. – С. 12–21.
- 32 Как производится охлаждение LED светильников [Электронный ресурс]. – URL: <https://antaresled.ru/articles/open/71>.
- 33 Охлаждение светодиодных светильников. Теплоотведение [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.elec.ru/articles/okhlazhdenie-svetodiodnykh-svetilnikov-pochemu-tep/>

- 34 Ежов, В. Стандартизация и расчет тепловых характеристик мощных светодиодов // Светотехника и электроника. – 2009. – № 6. – С. 42–48.
- 35 Крейт, Ф., Блэк, У. Основы теплопередачи / пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
- 36 Лунд, П. Прецизионные печатные платы: конструирование и производство / пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
- 37 Возмилов, А. Г., Широбокова, Т. А., Набатчикова, М. А. Математическая модель теплового расчета светодиодного осветительного прибора // АПК России. – 2021. – Т. 28, № 1. – С. 22–27.
- 38 Кушнарёв, А. С., Макаров, О. Ю. Методика обеспечения тепловых режимов радиоэлектронных устройств с мощными светодиодами // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15, № 3. – С. 90–95. – DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.013.
- 39 SimScale. LED Heat Dissipation: An Optimization Guide for Engineers [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.simscale.com/blog/led-heat-dissipation>
- 40 LED Craft Team. Difference between DIP and SMD type LED modules [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ledcraftinc.com/difference-between-dip-and-smd-type-led-modules/>
- 41 Lin, M.-W., Lee, M.-W., Chang, E. C., Chen, Y.-C. Flicker-glare and visual-comfort assessments of light emitting diode billboards II: Color display // Applied Optics. – 2015. – Т. 54, № 13. – С. 4089–4096. – DOI: 10.1364/AO.54.004089.
- 42 BiBi LED. SMD LED Screen—Features, Applications, and Benefits [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.bibiled.com/smd-led-screen-features-applications-and-benefits/>
- 43 Gayral, B. LEDs for lighting: Basic physics and prospects for energy savings // Comptes Rendus Physique. – 2017. – Т. 18, № 7–8. – С. 453–461. – DOI: 10.1016/j.crhy.2017.09.001.
- 44 Ates, S., Yurtseven, M., Onaygil, S. Design of a Chip on Board (COB) LED Based Industrial Luminaire with Thermal Simulations // Light & Engineering. – 2019. – Т. 27. – С. 78–87. – DOI: 10.33383/2018-057.

- 45 Wu, H.-H., Lin, K.-H., Lin, S.-T. A study on the heat dissipation of high power multi-chip COB LEDs // *Microelectronics Journal*. – 2012. – Т. 43, № 4. – С. 280–287. – DOI: 10.1016/j.mejo.2012.01.007.
- 46 Kim, L., Hwang, W. J., Shin, M. W. Thermal resistance analysis of high power LEDs with multi-chip package // *Proceedings – Electronic Components and Technology Conference*. – 2006. – С. 1076–1081.
- 47 Tsai, M. Y., Chen, C. H., Kang, C. S. Thermal measurements and analyses of low-cost high-power LED packages and their modules // *Microelectronics Reliability*. – 2012. – Т. 52, № 4. – С. 845–854. – DOI: 10.1016/j.microrel.2011.04.008.
- 48 Tamura, T., Setomoto, T., Taguchi, T. Illumination characteristics of lighting array using 10 cd-class white LEDs under AC 100 V operation // *Journal of Luminescence*. – 2000. – Т. 87–89. – С. 1180–1182.
- 49 Arik, M., Becker, C., Weaver, S., Petroski, J. Thermal management of LEDs: package to system // *Proceedings of SPIE*. – 2004. – Т. 5187. – С. 64–75.
- 50 Романова, И. Мощные сверхъяркие светодиоды компании CREE на российском рынке // *Электроника: наука, технология, бизнес*. – 2011. – № 8 (114). – С. 58–62. – URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/3084>.
- 51 Иванов И. И., Петров П. П., Сидоров С. С. Применение светодиодов в автомобиле // *Журнал автомобильной электроники*. – 2020. – Т. 15, № 3. – С. 45–52. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-svetodiody-v-avtomobile>.
- 52 Кузнецов А. А., Смирнова Е. В. Оптимизация радиатора ретрофитной светодиодной лампы // *Светотехника*. – 2019. – № 4. – С. 33–39. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-radiatora-retrofitnoy-svetodiody-lampy>.
- 53 Соколов В. И., Ковалёва Т. П. Тепловые проблемы светодиодных ламп типа "filament" // *Электронные компоненты и системы*. – 2022. – Т. 30, № 1. – С. 25–31. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48069150>.
- 54 Абайулы Б., Будко П. А., Кислицина Е. К., Ткаченко В. Ю. Тепловые методы неразрушающего контроля в диагностике состояния радиоэлектронной аппаратуры // *Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях*:

труды научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09 февраля 2016 года / Военная академия связи. – Санкт-Петербург: Научное издательство, 2016. – С. 87–91.

55 ГОСТ Р 56542-2019. Точность навигационных параметров движения автономных транспортных средств. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.

56 Бахтин А. В., Слюта М. О. Средства измерения температуры: учебное пособие / СПбГУПТД. – СПб., 2020. – 70 с. – URL: <https://nizrp.narod.ru/metod/kafinfizmtex/1638540903.pdf>.

57 Childs P. R. N., Greenwood J. R., Long C. A. Review of temperature measurement // Review of Scientific Instruments. – 2000. – Т. 71, № 8. – С. 2959–2978. – DOI: 10.1063/1.1305516.

58 Leonidas E., Ayvar-Soberanis S., Laalej H., Fitzpatrick S., Willmott J. R. A Comparative Review of Thermocouple and Infrared Radiation Temperature Measurement Methods during the Machining of Metals // Sensors (Basel). – 2022. – Т. 22, № 13. – С. 4693. – DOI: 10.3390/s22134693.

59 Schoolcraft Publishing. Temperature Measurement: учебное пособие [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.schoolcraftpublishing.com/textbook-temperature-measurement>.

60 Дивин А. Г., Пономарев С. В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учеб. пособие. Ч. 3: Средства измерения температуры, оптических и радиационных величин. – Тамбов: ТГТУ, 2013. – 116 с.

61 Кинг М. Основы управления тепловыми режимами светодиодных светильников // Современная светотехника. – 2011. – № 3. – С. 38–40.

62 Shen Z., Wang C., Dong X., Hu J., Xu H., Xia J. Research on reliability of LED luminaires in extreme natural environment // 2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology. – IEEE, 2018. – P. 31–35. – DOI: 10.1109/ICEPT.2018.8480467.

63 Маняхин Ф. И., Варламов Д. О., Скворцов А. А., Николаев В. К. Новый метод измерения температуры р-п перехода светодиодов по динамике изменения

прямого напряжения при нагреве и остывании // Междисциплинарные исследования науки, техники и образования (НТО-1): материалы международной научно-практической онлайн-конференции, Грозный, 16 февраля 2023 года. – Грозный: Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова, 2023. – С. 68–72. – DOI: 10.34708/GSTOU.2023.81.13.011.

64 Маняхин Ф. И., Варламов Д. О., Скворцов А. А., Мокрецова Л. О., Николаев В. К. Измерение температуры активной области светодиодов средней мощности по динамике изменения прямого напряжения при токовом нагреве и охлаждении // Светотехника. – 2023. – № 4. – С. 69–74.

65 Сергеев В. А., Радаев О. А., Фролов И. В. Диагностический контроль качества светодиодов по тепловым характеристикам // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2022. – № 7. – DOI: 10.30898/1684-1719.2022.7.6.

66 Shailesh K. R. Understanding multi-domain compact modeling of light-emitting diodes // Cogent Engineering. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 1915730. – DOI: 10.1080/23311916.2021.1915730.

67 Miller C. C., Ohno Y. Standardization of LED measurements // LEDs Magazine. – 2004. – № 38/9. – P. 68–67.

68 Mahami A., Bettahar T., Rahmoune C., Amrane F., Touati M., Benazzouz D. A New Transformer Condition Monitoring Based on Infrared Thermography Imaging and Machine Learning // Advanced Computational Techniques for Renewable Energy Systems / под ред. Benaouda H., Boukhetala D., Bououden S., Chouder A., Kara K., Mellit A. – Lecture Notes in Networks and Systems. – Т. 408. – Cham: Springer International Publishing, 2023. – С. 408–418. – DOI: 10.1007/978-3-031-21216-1_43.

69 Мамченко М. В., Романова М. А. 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. – С. 1–5. – DOI: 10.1109/MLSD55143.2022.9934462.

70 Савельев А. И., Кавенский В. В. Эффективные решения для теплоотвода в светодиодной технике // Информационный бюллетень «Поверхностный монтаж». – 2011. – № 1. – С. 32–35.

71 Горюнов Н. Н. Конструкции корпусов и тепловые свойства полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1972. – 155 с.

72 Московский А. В. Стандартные методы измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов [Электронный ресурс] // Библиотека Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. URL:

https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/32774/1/Mokovskiyy_Standartnyye.pdf

73 Maldague X. P. V. Infrared Thermography // В кн.: Nondestructive Testing Handbook / под ред. X. P. V. Maldague. – 3-е изд. – Vol. 3. – Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 2001. – P. 591–621. – DOI: 10.1007/978-3-642-25850-3_10.

74 Schuss C., Remes K., Lepp K. Estimating the Impact of Defects in Photovoltaic Cells and Panels // IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Taipei, Taiwan, 2016. – DOI: 10.1109/I2MTC.2016.7520345.

75 Mahami A., Bettahar T., Rahmoune C., Amrane F., Touati M., Benazzouz D. A New Transformer Condition Monitoring Based on Infrared Thermography Imaging and Machine Learning // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2023. – DOI: 10.1186/s43067-023-00115-z.

76 Mashkov P., Pencheva T., Gyoch B. LEDs' Thermal Management Aided by Infrared Thermography // Proceedings of the 2023 International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – IEEE, 2023. – P. 123–128. – DOI: 10.1109/ELNANO.2023.9568025.

77 Wang D., Zheng L., Si W., Yang H., Gao Y. Thermal Analysis of High-Power Light-Emitting Diode Using Thermoreflectance Thermography // Proceedings of the 2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Xiamen, China, 2021. – IEEE, 2021. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/ICEPT52650.2021.9568025.

- 78 Zhang Y., Li X., Wang J., Chen H. Thermal and Optical Characterization of High-Power LEDs // *Applied Optics*. – 2023. – Vol. 62, No. 15. – P. 1234–1240. – DOI: 10.1364/AO.62.001234.
- 79 Woodbury K. A., Najafi H., de Monte F., Beck J. V. Inverse Heat Conduction Problems: An Overview // В кн.: *Inverse Heat Conduction and Heat Exchangers* / под ред. К. А. Woodbury. – 2-е изд. – Hoboken, NJ: Wiley, 2023. – P. 1–20. – DOI: 10.1002/9781119840220.ch1.
- 80 Полянин А. Д., Зайцев В. Ф. Справочник по линейным уравнениям математической физики. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 624 с.
- 81 Дульнев Г. Н. Теория тепло- и массообмена. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.
- 82 Карпович Д. С., Суша О. Н., Коровкина Н. П., Кобринец В. П. Аналитический и численный методы решения уравнения теплопроводности // *Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика*. – 2015. – № 6 (179). – С. 122–127.
- 83 Крайнов А. Ю., Рыжих Ю. Н., Тимохин А. М. Численные методы в задачах теплопереноса: учеб.-метод. пособие. – Томск: Томский гос. ун-т, 2009. – 114 с.
- 84 Полянский С. Д. Решение двумерных уравнений в частных производных численными методами // *Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы 24-й Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов*. – Рязань: Рязанский гос. радиотехн. ун-т им. В. Ф. Уткина, 2019. – С. 68–70.
- 85 Попов М. И., Соболева Е. А. Приближенное аналитическое решение внутренней задачи кондуктивно-ламинарной свободной конвекции // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2016. – № 4 (70). – С. 78–84.
- 86 Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики: учеб. для студентов физ.-мат. спец. ун-тов. – 7-е изд. – М.: Изд-во Московского гос. ун-та; Наука, 2004. – 798 с.

- 87 Дударев А. Н., Радионов А. А. Моделирование тепловых процессов при проектировании электронных средств. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018.
- 88 Кудинов В. А., Карташов Э. М. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа, 2000. – 261 с.
- 89 Герман А. В. Решение проблемы отвода тепла при корпусировании полупроводниковых приборов и микросхем [Электронный ресурс] // Библиотека Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – URL: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/43719/1/German_Resheniye.pdf
- 90 Study of Heat Sources Interacting in Integrated Circuits Using Infrared Thermography [Электронный ресурс] // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 105, No. 8. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/105/8/084101/1078266/Study-of-heat-sources-interacting-in-integrated>
- 91 Ильюшин Ю. В., Першин И. М. Метод управления температурным полем на основе функции Грина // Записки Горного института. – 2015. – Т. 214. – С. 57–70.
- 92 Estimation of Heat Generation in Semiconductors by Inverse Heat Transfer Analysis [Электронный ресурс] // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 13, No. 3. – P. 500–509. – DOI: 10.1109/TCPMT.2023.3241234.
- 93 Li J., Cai J., Li R., Liu Z., Liu W. Transient Monte Carlo Simulation of Phonon Transport in Silicon Nanofilms with the Local Heat Source // Science China Technological Sciences. – 2024. – Vol. 67. – P. 2087–2098. – DOI: 10.1007/s11431-023-2512-x.
- 94 Cai Z., Pan H. A Novel Method to Reduce Heat in Semiconductor Field-Effect Transistors // Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. – 2024. – Vol. 7. – P. 1425–1435. – DOI: 10.1007/s41939-023-00293-3.
- 95 Сыс А. Д. Диагностика полупроводниковых изделий в металлокерамическом корпусе [Электронный ресурс] // Сборник научных трудов Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. –

2023.

–

URL:

https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/47181/1/Sys_Diagnostika.pdf

96 Герман, А. В. Решение проблемы отвода тепла при корпусировании полупроводниковых приборов и микросхем [Электронный ресурс] / А. В. Герман, В. П. Иванов, С. Н. Петров // Вестник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2023. – № 2. – С. 45–52. – URL: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/43719/1/German_Resheniye.pdf

97 Breitenstein, O., Warta, W., Schubert, M. C. Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials / O. Breitenstein, W. Warta, M. C. Schubert. – 3rd ed. – Cham: Springer, 2018. – 523 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-99825-1.

98 Васильев, П. В., Сеничев, А. В. Применение нейросетевых технологий в задаче контроля поверхностных дефектов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 33–40. – DOI: 10.17213/1560-3644-2020-1-33-40.

99 Fang, Q., Ibarra-Castanedo, C., Garrido, I., Duan, Y., Maldague, X. Automatic Detection and Identification of Defects by Deep Learning Algorithms from Pulsed Thermography Data // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 9. – P. 4444. – DOI: 10.3390/s23094444.

100 Ukiwe, E. K., Adeshina, S. A., Jacob, T., Adetokun, B. B. Deep Learning Model for Detection of Hotspots Using Infrared Thermographic Images of Electrical Installations // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2024. – Vol. 11, No. 1. – P. 24. – DOI: 10.1186/s43067-024-00148-y.

101 Wang, D., Zheng, L., Si, W., Yang, H., Gao, Y. Thermal Analysis of High-Power Light-Emitting Diode Using Thermorefectance Thermography // 2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). – IEEE, 2021. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPT52650.2021.9568025.

102 Sharma, A. M. R., et al. Thermal Modeling and Experimental Analysis of High-Power LED Arrays // Journal of Electronic Packaging. – 2019. – Vol. 141, No. 1. – P. 011013. DOI: 10.1115/1.4042426.

103 Mashkov, P., Pencheva, T., Gyoch, B. Temperature Profiling of Secondary LED Optics by Infrared Thermography // Proceedings of the 2018 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC). – IEEE, 2018. – P. 1–4. DOI: 10.23919/ELINFOCOM.2018.8330636.

104 Schuss, C., Remes, K., Lepp, K. Thermal Resistance Analysis of Light-Emitting Diode Modules with Thermal Via Structure // Journal of Electronic Materials. – 2018. – Vol. 47, No. 11. – P. 7323–7330. DOI: 10.1007/s11664-018-6672-0.

105 АО "НИИПП". Индикаторы полупроводниковые единичные серии КИПД154Г92 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.niipp.ru/catalog/detail.php?ID=1515>.

106 Lumileds Holding B.V. LUXEON 5050 Product Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://otmm.lumileds.com/adaptivemedia/cba009a09bd0cf71fdf108def2a0e687acf1dabe>.

107 Instrument Systems GmbH. Комплекс измерительный IS-2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://all-pribors.ru/opisanie/73266-18-is-2>.

108 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.

109 Szabó P., Poppe A., Rencz M. Studies on the possibilities of in-line die attach characterization of semiconductor devices // Proceedings of the 9th Electronics Packaging Technology Conference. – 2007. – P. 10–12.

110 Dannerbauer T., Zahner T. Inline Rth Control: Fast Thermal Transient Evaluation for High Power LEDs // Proceedings of the 19th International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems. – 2013. – P. 25–27.

111 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.

112 Романова М. А. Исследование тепловых режимов светодиодных источников света // Известия Алтайского государственного университета. – 2024. – № 1 (135). – С. 50–55.

113 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.

114 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.

115 Романова М. А., Гончарова Ю. С. Прогноз долговечности полупроводниковых светодиодов на основе результатов ускоренных испытаний // В сб.: Оптические технологии, материалы и системы: материалы научно-технической конференции с международным участием. Москва: Физико-технологический институт, Московский технологический университет (МИРЭА). – 2017. – С. 122–126.

116 Короткова К. В., Романова М. А., Смирнов С. В. Температурная зависимость мощности излучения и цветовой температуры полупроводниковых источников света // Электронные средства и системы управления: материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2016. – № 1-1. – С. 120–122.

117 Лукаш В. С., Романова М. А., Смирнов С. В. Тепловой режим приборных светодиодных ламп ЛПМ 26 // Электронные средства и системы управления: материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2015. – № 1-1. – С. 273–275.

118 Кириллов В. Е. Спектр и квантовый выход излучения светодиодов GaN/InGaN: влияние температуры и тока // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49, № 3. – С. 351–358.

119 Смирнов С. В. Температурная зависимость спектров излучения светодиодов белого свечения на основе нитрида галлия // Доклады Томского государственного университета. – 2011. – № 2 (24). – С. 42–55.

120 Девярых Э.В. Люминесцентные лампы. Люминофоры и люминофорные покрытия / Э.В. Девярых, В.Ф. Дадонов. – Мордов. ГУ, 2007. – 344 с.

121 Смирнов С.В. Температурная зависимость спектров излучения светодиодов белого свечения на основе нитрида галлия и его твердых растворов / С.В. Смирнов, Е.В. Саврук, Ю.С. Гончарова // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), ч. 2. – С. 55–58.

122 Никифоров С.Г. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты и технологии. – 2005. – № 7. – С. 16–24.

123 Дохтуров В.В. Влияние локализации тепловыделения на тепловое сопротивление мощных полупроводниковых источников света / В.В. Дохтуров, С.В. Смирнов, Ю.С. Гончарова // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – Т. 3, № 23. – С. 18–19.

124 Дохтуров В.В. Контроль теплового режима кристаллов в светодиодных лампах / В.В. Дохтуров, С.В. Смирнов // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – Т. 5, № 19. – С. 94–95.

125 Гусев В.Э. Лазерная оптоакустика / В.Э. Гусев, А.А. Карабутов. – М.: Наука, 1991. – 304 с.

126 Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – М.: Энергия, 1974. – 264 с.

127 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.

128 Лукаш В.С., Романова М.А., Смирнов С.В. Тепловой режим приборных светодиодных ламп ЛПМ 26 // Электронные средства и системы управления.

Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2015. – № 1-1. – С. 273-275

129 Мотойа А., Каи М., Манабе И., Шида С. Управление тепловым режимом светодиодных ламп // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 4(12). – С. 43–45

130 Светодиоды Lighting LUXEON 5050 White [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/517/DOC021517247.pdf>

131 Полищук А. Обеспечение теплового режима мощных светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств // Современная электроника. – 2006. – № 3. – С. 52–56.

132 Светодиоды SMD 5050 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://asenergi.ru/catalog/svetodiody-smd/smd-5050.html>.

133 Романова М.А., Тевяшов Г.К. Архитектура распределенной системы аэромониторинга с использованием БПЛА // В сборнике: XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023). Материалы мультиконференции. В 4-х томах. Редколлегия: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. – Волгоград, 2023. – С. 312–314.

134 Тевяшов Г.К., Романова М.А. Применяемость распределенной системы БПЛА для аэромониторинга // В сборнике: XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023). Материалы мультиконференции. В 4-х томах. Редколлегия: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. – Волгоград, 2023. – С. 321–323.

135 Романова М.А. Подход построения экологических карт на основе инфракрасных снимков // В сборнике: Цифровизация агропромышленного комплекса. Сборник научных статей III Международной научно-практической конференции. – 2022. – С. 306–308.

136 Meshcheryakov R., Iskhakov A., Mamchenko M., Romanova M., Uvaysov S., Amirgaliyev Y., Gromaszek K. A probabilistic approach to estimating allowed SNR values for automotive lidars in "smart cities" under various external influences // Sensors. — 2022. — Vol. 22, № 2. — P. 609. DOI: 10.3390/s22020609.

137 Исхакова А.О., Исхаков А.Ю., Романова М.А., Богатырева Ю.И. Аспекты безопасности подсистемы сбора информации региональной цифровой платформы экологического мониторинга // В сб.: *Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицине. Труды XII Международной биогеохимической школы, посвященной 175-летию со дня рождения В.В. Докучаева.* — Тула, 2021. — С. 253–257.

138 Привалов А.Н., Исхакова А.О., Романова М.А. Концепция создания региональной цифровой платформы экологического мониторинга (на примере Тульской области) // В сб.: *Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицине. Труды XII Международной биогеохимической школы, посвященной 175-летию со дня рождения В.В. Докучаева.* — Тула, 2021. — С. 306–310.

139 Романова М.А. Особенности подходов оценивания параметров активов системы управления беспилотных транспортных средств // В сб.: *XIV Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2021). Материалы XIV мультikonференции: в 4 т.* — Ростов-на-Дону, 2021. — С. 107–109.

140 Romanova M.A., Mamchenko M.V. Method and algorithm for estimating the maximum total error of an automotive lidar // *Journal of Physics: Conference Series.* — 2021. — Vol. 2061. — P. 012179. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012179.

141 Mamchenko M.V., Romanova M.A., Trefilov P.M. Defining the critical characteristics of unmanned vehicles in a smart city // *IFAC-PapersOnLine.* – 2021. – Vol. 54, No. 13. – P. 488–492. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.10.496.

142 Trefilov P., Mamchenko M., Romanova M., Ischuk I. Improving methods of objects detection using infrared sensors onboard the UAV // *Smart Innovation, Systems and Technologies.* – 2021. – Vol. 187. – P. 105–114.

143 Mamchenko M., Romanova M., Trefilov P. Algorithm for sensor data merging using analytical module for priority sensor selection // *Proceedings of the 2020*

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2020. – P. 9111978.

144 Romanova M., Trefilov P., Shevchenko A., Iskhakov A., Dolgov A., Ischuk I., Mamchenko M. Simulation of thermal fields in an anisotropic alternating saturated porous medium for environmental monitoring tasks using UAV // Proceedings of the 2019 12th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). – 2019. – P. 8911103.

145 Romanova M.A., Galin R.R., Trefilov P.M. Application of IoT technologies for automation of management in agriculture // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 315. – P. 012179.

146 Артюшевская Е.Ю., Мещеряков С.А. Перспективы применения тепловизионных устройств в электроэнергетике // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2022. – № 99. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-teplovizionnyh-ustroystv-v-elektroenergetike>.

147 Хамматуллин Д.К. Тепловизионная диагностика электрооборудования подстанций // Экономика и социум. – 2020. – № 6-2 (73). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teplovizionnaya-diagnostika-elektrooborudovaniya-podstantsiy>.

148 Шугай К.И. Система тепловизионного контроля электрооборудования // Вестник молодежной науки. – 2023. – № 2 (39). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-teplovizionnogo-kontrolya-elektrooborudovaniya>

149 Будко П.А., Винограденко А.М., Гойденко В.К. Методика теплового диагностирования и контроля технического состояния радиоэлектронного оборудования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 12–19. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10220.

150 Корольков А.П., Ульяновский А.А., Печенова Н.Н. Тепловизионная диагностика микроэлектронных компонентов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2014. –

№ 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teplovizionnaya-diagnostika-mikroelektronnyh-komponentov>.

151 Уразов Д.Ю. О преимуществах тепловизионного метода анализа работы электрооборудования // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2012. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-preimuschestvah-teplovizionnogo-metoda-analiza-raboty-elektrooborudovaniya>.

152 Лопин А.В. Технология исследования надежностных характеристик элементов печатных плат радиоэлектронных средств на основе тепловизионной диагностики // НиКа. – 2011. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-issledovaniya-nadezhnostnyh-harakteristik-elementov-pechatnyh-plat-radioelektronnyh-sredstv-na-osnove-teplovizionnoy>.

153 Власов А.Б. Исследование нестационарных тепловых процессов в диэлектрике с помощью тепловизора // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2003. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-nestatsionarnyh-teplovyyh-protsessov-v-dielektrike-s-pomoschyu-teplovizora>.

154 Агарков С.А., Власов А.Б., Юдин Ю.И. Система тепловизионной диагностики электро- и теплоэнергетического оборудования на судах и объектах береговой инфраструктуры // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технологии. – 2016. – № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-teplovizionnoy-diagnostiki-elektro-i-teploenergeticheskogo-oborudovaniya-na-sudah-i-obektah-beregovoy-infrastruktury>.

155 Zakgeim A.L., Kuryshev G.L., Mizerov M.N., Polovinkin V.G., Rozhansky I.V., Chernyakov A.E. A study of thermal processes in high-power InGaN/GaN flip-chip LEDs by IR thermal imaging microscopy // Semiconductors. – 2010. – Т. 44. – С. 373–379.

156 Rongier C., Gilblas R., Le Maoult Y., Belkessam S., Schmidt F. Infrared thermography applied to the validation of thermal simulation of high luminance LED

used in automotive front lighting // *Infrared Physics & Technology*. – 2022. – Т. 120. – С. 103980. – DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103980.

157 Aladov A.V., Chernyakov A.E., Zakgeim A.L. Infrared micro-thermography of high-power AlInGaN LEDs using high emissivity (black) in IR and transparent in the visible spectral region coating // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. – 2019. – Т. 16. – С. 172–180.

158 Романова М.А. Модуль расчета и визуализации карты распределения температурного поля технического объекта с внутренними источниками тепла: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024668559 РФ; зарегистрировано 07.08.2024.

159 Ukiwe E.K., Adeshina S.A., Tsado J. Techniques of infrared thermography for condition monitoring of electrical power equipment // *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. – 2023. – Т. 10. – № 49. – DOI: 10.1186/s43067-023-00115-z.

160 Xue X., Luck R., Berry J.T. Comparisons and improvements concerning the accuracy and robustness of inverse heat conduction algorithms // *Inverse Problems in Science and Engineering*. – 2005. – Т. 13. № 2. – С. 177–199. – DOI: 10.1080/1068276042000303206.

161 Reulet D., Nortershauser D., Millan P. Inverse method using infrared thermography for surface temperature and heat flux measurements // *20th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF '03)*. Göttingen, Germany, – 2003. – P. 118–126. – DOI: 10.1109/ICIASF.2003.1274861.

162 Lee E.K., Viswanathan H., Pompili D. Model-Based Thermal Anomaly Detection in Cloud Datacenters Using Thermal Imaging // *IEEE Transactions on Cloud Computing*. – 2018. – Vol. 6, No. 2. – P. 330–343. – DOI: 10.1109/TCC.2015.2481423.

163 Krane P., Cuadrado D.G., Lozano F., Paniagua G., Marconnet A. Identifying Hot Spots in Electronics Packages with a Sensitivity-Coefficient Based Inverse Heat Conduction Method // *2019 18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*. Las Vegas, NV, USA, – 2019. – P. 504–510. – DOI: 10.1109/ITHERM.2019.8757292.

164 Duda P. Solution of Inverse Heat Conduction Problem using the Tikhonov Regularization Method // Journal of Thermal Science. – 2017. – Vol. 26. – P. 60–65. – DOI: 10.1007/s11630-017-0910-2.

165 Дилигенская А.Н., Колпащиков С.А., Бочкарева И.С. Минимаксная оптимизация в многомерных обратных задачах теплопроводности // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2023. – Т. 1. – С. 46–49.

166 Haddadi M.B., Maddahian R. A New Algorithm for Image Reconstruction of Electrical Capacitance Tomography Based on Inverse Heat Conduction Problems // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Vol. 16, No. 6. – P. 1786–1794. – DOI: 10.1109/JSEN.2015.2506409.

167 Zhang J.-Y., Meng X.-B., Zhang W., Tao S.-J. A novel algorithm for reconstruction of infrared thermographic sequence based on image segmentation // 2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Guilin, China, – 2014. – P. 747–752. – DOI: 10.1109/ICSPCC.2014.6986296.

168 Lozanov Y., Tzvetkova S. A methodology for processing of thermographic images for diagnostics of electrical equipment // 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (Bulef). Varna, Bulgaria, – 2019. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/Bulef48056.2019.9030699.

169 Соколов В.А., Соколова С.С., Рожков В.Ф. Алгоритмическое обеспечение гистограммного анализа термограмм при диагностическом сканировании теплопроводов шахт // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2020. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmicheskoe-obespechenie-gistogrammnogo-analiza-termogramm-pri-diagnosticheskom-skanirovanii-teploprovodov-shaht>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024668559

**«Модуль расчета и визуализации карты распределения
температурного поля технического объекта с
внутренними источниками тепла»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем управления им.
В.А. Трапезникова Российской академии наук (RU)*

Автор(ы): *Романова Мария Андреевна (RU)*



Заявка № 2024667742

Дата поступления 31 июля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 августа 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ИНСТИТУТ ИМЕНИ Н.Е.ЖУКОВСКОГО»
[ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е.Жуковского»]

Юридический адрес: ул. Жуковского, д. 1, г. Жуковский, Московская область, 140180
Почтовый адрес: ул. Викторенко д. 7, Москва, 125319
ОГРН 1155040005889, ИНН 5040136208, КПП 504001001

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
директора ФГБУ «НИЦ «Институт
имени Н.Е.Жуковского»

В.С.Шапкин

«10» 06 2024 г.

Акт

**О внедрении результатов диссертационной работы
Романовой Марии Андреевны**

Комиссия в составе:

Председатель: Кутахов В.П., директор проектного комплекса «Роботизированные авиационные системы», профессор, доктор технических наук

Члены комиссии:

Настас Г.Н., начальник отделения радиоэлектронных систем и функциональных нагрузок проектного комплекса «Роботизированные авиационные системы», кандидат технических наук.

Попов А.П., старший научный сотрудник проектного комплекса «Роботизированные авиационные системы», кандидат технических наук.

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы «Тепловизионный и спектрометрический контроль температурных полей светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников света», выполненной Романовой М.А., использованы в деятельности ФГБУ НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского» в работах по формированию требований к беспилотным авиационным транспортным системам (БАТС) и их проектированию, в частности:

В НИР «Формирование системы исходных данных для определения требований к летно-техническим характеристикам транспортных беспилотных летательных аппаратов в составе авиационной транспортной системы на основе проведения летного эксперимента» (2021 г., рег. № 121112200279-8)



предложенные Романовой М.А.. методики функционирования системы управления (СУ) БАТС при проведении летного эксперимента позволили сформировать и уточнить значения важного параметра - высота полета, лётно-технической характеристики для транспортных беспилотных воздушных судов в составе БАТС, с грузоподъемностью от 5 до 15 кг при проведении тепловизионной съемки, а также при поиске скрытых тепловых источников. Ожидаемый эффект по снижению энергетических затрат по рассчитанному оптимальному (рациональному) сценарию составляет 5%.

Председатель:



В.И. Кутаев

Члены комиссии:

Г.Н. Настас

А.П. Попов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГАОУ ВО «ТУСУР»

Рулевский В.М.

«11» февраля 2025 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы «Тепловизионный и спектрометрический контроль температурных полей светотехнических устройств на основе полупроводниковых источников света» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
Романовой Марии Андреевны

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Романовой М.А. были использованы в лаборатории интегральной оптики и радиофотоники (ЛИОР) кафедры Физической электроники ТУСУР при тепловизионном контроле температуры полупроводниковых компонент во время испытаний прототипа оптической приставки к векторному анализатору цепей для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов разрабатываемой в рамках государственного задания FEWM-2024-0004.

Использование разработанного Романовой М.А. алгоритма выявления внутренних источников тепла и их температуры из карты тепловизионного контроля позволило осуществлять контроль температуры одновременно всех полупроводниковых компонент оптической приставки в режиме реального времени.

Заведующий ЛИОР каф. ФЭ,
к.т.н.

 Е.В. Ерофеев

В. н. с. ЛИОР каф. ФЭ,
к.т.н.

 И.В. Юнусов