

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**
(ТУСУР)

УДК 621.32

На правах рукописи



Афонин Кирилл Нильевич

**ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ИСТОЧНИКА СВЕТА НА ОСНОВЕ GaN/InGaN В
СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМПАХ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

Диссертация на соискание учёной степени

Кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Туев Василий Иванович

Томск 2021

Оглавление

Введение.....	5
1 Состояние вопроса. Методы теплового анализа	13
1.1 Методы анализа теплопередачи: конвекции, излучения и теплопроводности	13
1.1.1 Классические методы решения дифференциального уравнения теплопроводности	16
1.1.2 Методы интегрального преобразования.....	18
1.1.3 Методы численных решений.....	19
1.2 Методы обеспечения теплового режима светодиодных ламп	23
1.2.1 Конструкции светодиодных ламп.....	23
1.2.2 Значимость теплового режима	26
1.2.3 Обеспечение теплового режима увеличением теплопроводности материалов	28
1.2.4 Изменение размеров конструкций светодиодного модуля и лампы	29
1.3 Неравномерность температурного профиля	32
1.3.1 Общие сведения	32
1.3.2 Снижение температуры светодиодного модуля теплоизлучающим покрытием	32
1.3.3 Распределение кристаллов по подложке.....	34
1.4 Теплоперенос в колбе в дополнение к конвекции.....	36
1.4.1 Активное охлаждение потоком ионов.....	36
1.4.2 Увеличение коэффициента конвекции за счёт отверстий в колбе	36
1.5 Цель и задачи исследований	39

2	Моделирование светодиодной лампы с нитевидными светодиодными модулями.....	40
2.1	Среда моделирования.....	40
2.2	Описание моделей.....	42
2.2.1	Разработка модели нитевидного светодиодного модуля.....	42
2.2.2	Разработка модели светодиодной лампы.....	45
2.3	Результаты моделирования и анализ.....	47
2.3.1	Тепловое распределение в светоизлучающем модуле.....	47
2.3.2	Тепловое распределение в светодиодной лампе.....	49
2.4	Оценка адекватности модели.....	52
2.5	Выводы по результатам моделирования.....	55
3	Результаты исследований новых технических решений.....	56
3.1	Светодиодная лампа со светодиодным модулем с распределёнными кристаллами.....	56
3.1.1	Описание конструкции.....	56
3.1.2	Разработка моделей и тепловые расчёты светодиодного модуля с распределёнными кристаллами и лампы.....	57
3.2	Светодиодная лампа с линзой.....	59
3.2.1	Описание конструкции.....	59
3.2.2	Разработка модели светодиодной лампы и тепловой расчёт.....	60
3.2.3	Исследование характеристик макетных образцов ламп.....	63
3.3	Светодиодная лампа с источником свободных электронов.....	68
3.3.1	Описание конструкции.....	68
3.3.2	Принцип работы и оценка эффективности охлаждения потоком электронов.....	69

3.3.3 Моделирование и тепловые расчёты светодиодной лампы с газовым наполнением повышенной теплопроводности	74
3.4 Температурные зависимости электрических и световых параметров макетов светодиодных модулей	77
3.5 Ресурсные испытания макетов светодиодных ламп	82
4 Заключение.....	85
Список использованных источников	87
Приложение А. Копии подтверждающих документов	103
Приложение Б. Перечень средств измерений и испытательного оборудования	112

Актуальность работы

Получение электрической энергии неразрывно связано с затратами угля, нефти, газа и других природных ресурсов. На фоне ежегодно увеличивающегося мирового энергопотребления [1-3] исследователи и инженеры находятся в постоянном поиске путей увеличения эффективности электроприборов для снижения энергопотребления. По различным данным [4-7] на цели освещения тратится до 20% вырабатываемой электроэнергии.

С момента открытия источников света (ИС), работающих от электрической сети, проблемы увеличения таких характеристик как надёжность и эффективность всегда стоят на первом месте. Начало модернизации электрических ИС можно считать с лампы накаливания, промышленные образцы которой обладали световой отдачей до 16 лм/Вт, а срок службы в среднем не превышал 1500 часов. Развитие полупроводниковой электроники в 1920-х годах Олегом Владимировичем Лосевым привело к открытию явления электролюминесценции в выпрямляющих диодах, выполненных из полупроводниковых материалов. С этого события появилось направление твердотельной электроники, связанное с освещением. Технология получения пленки из карборунда была разработана к концу 1960-х годов. С ее помощью изготавливали полупроводниковые устройства с p-n-переходом. Лучшие светодиоды (СД) на основе карбида кремния излучали свет с длиной волны 470 нм и имели значения коэффициента полезного действия (КПД) порядка 0,03%. На сегодняшний день промышленные образцы СД обладают световой отдачей в 150 – 170 лм/Вт, а лабораторные образцы компании «Cree» достигают значения 300 лм/Вт [8-10]. Срок службы СД, теоретически, может приближаться к значению в 100 тыс. ч. Именно по этим причинам, СД стали самым перспективными ИС в освещении. Переходя от ламп накаливания к СД освещению расходы электроэнергии снижаются в 10 раз, а в сравнении с электролюминесцентными лампами расходы снижаются в 1,5 – 2,5 раза.

В статье [11] авторы по результатам обзора рынка светодиодов показывают динамику снижения стоимости СД и увеличения спроса СД продукции.

Новым этапом развития светодиодных ламп стала конструкция с использованием светодиодных нитей. В таких лампах преобразование электрической энергии в световую осуществляется нитевидными светодиодными модулями (СДМ), сконструированными по технологии «COB (chip-on-board)» и представляющими собой последовательность GaN/InGaN кристаллов на единой подложке. Вся сборка покрыта люминофорной композицией, преобразующей синее излучение кристаллов в жёлто-зеленое излучение так, что суммарный световой поток (излучение кристалла плюс преобразованное люминофором излучение) имеет параметры белого света. СДМ сконструированы в виде пространственной конструкции, расположенной внутри колбы лампы. Охлаждение светоизлучающих модулей осуществляется за счёт переноса тепловой энергии, вырабатываемой твердотельными GaN/InGaN кристаллами, через подложку нитей, газовую среду в колбе и материал колбы с последующим конвекционным воздушным охлаждением наружной поверхности колбы лампы.

Условия охлаждения GaN/InGaN кристаллов в лампе с нитевидными СДМ существенно сложнее, чем в светодиодных лампах на единичных светоизлучающих диодах, поэтому развитие основ построения, совершенствование основ проектирования и методик расчета, разработка, создание и внедрение нитевидных СДМ и светодиодных ламп на их основе с улучшенными тепловыми параметрами является актуальной задачей.

Степень разработанности темы

На режим работы и срок службы СДМ напрямую влияет его рабочая температура [12, 13]. Анализ литературных источников показал, что проблемы обеспечения теплового режима светодиодных ламп типа «filament» решены не окончательно. Данной проблеме посвящены труды коллективов авторов из Китая, Франции, США, России и др. [14-22]. Улучшение тепловых характеристик светодиодных ламп приводит к увеличению надёжности, срока службы и

светотехнических параметров, а, следовательно, и привлекательности для потребителя.

Вопросы теории теплообмена и расчёта теплового режима приборов подробно рассмотрены такими исследователями как Лыков А.В. [23] Дульнев Г.Н. [24], Кудинов В.А. [25] Парфенов В.Г. [26], Тихонов С.В. [27], Кузнецов Г.В. [28, 29] и др.

Изучению температурных зависимостей светодиодного модуля в светоизлучающих устройствах посвящены работы таких научных школ как Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Сергеев В.А., Смирнов В.И., Фролов И.В. и др. [30, 31]), Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Смирнов С.В., Малютин Н.Д., Еханин С.Г., Троян П.Е., Старосек Д.Г. и др. [32-39]), Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов (Вилисов А.А., Воропаев М.В., Каримбаев Д.Д. и др. [40-42]), Национального исследовательского Томского государственного университета (Коханенко А.П., Войцеховский А.В., Лозовой К.А. и др. [43, 44]), Санкт-Петербургского Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН (Бочкарева Н.И., Шретер Ю.Г., Горбунов Р.И. и др. [45, 46]) и др.. Однако задачи обеспечения теплового режима светодиодных ламп с нитевидными светодиодными модулями на основе кристаллов GaN/InGaN решены не окончательно.

Цели и задачи работы

Целью работы является обеспечение теплового режима светодиодного модуля на основе GaN/InGaN кристаллов в светодиодных лампах.

В настоящей работе достижение цели ограничено решением следующих задач:

- 1) Разработка модели светодиодной лампы с нитевидными светодиодными модулями, позволяющей изучение её тепловых характеристик.

2) Применение разработанной модели для анализа температурных полей в структуре нитевидного светодиодного модуля и светодиодной лампы и разработка новых технических решений с улучшенными температурными свойствами.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется применением метода конечно-элементного анализа и моделирования тепловых характеристик СДМ на основе GaN/InGaN кристаллов, и разработкой по результатам моделирования новых источников света с улучшенными эксплуатационными характеристиками и с увеличенным значением срока службы.

Научной новизной, в частности, обладают следующие основные результаты работы.

1) Математическая модель СДМ, представляющего собой последовательность GaN/InGaN кристаллов, расположенных на плоском основании и помещенных в замкнутый объем однородной среды, ограниченный теплоизолирующей оболочкой сложной формы, позволяющая рассчитывать значения температуры кристаллов, основания, среды и поверхности оболочки, расположенной в воздушной среде.

2) Установленная гиперболическая зависимость температуры GaN/InGaN кристаллов светодиодного модуля от теплопроводности материала линзы, дополняющей конструкцию лампы.

3) Новый способ стабилизации теплового режима светодиодных модулей в лампе с использованием электронного газа.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в том, что в рамках одного метода исследованы явления теплопереноса в системе последовательность полупроводниковых кристаллов – подложка – заполняющий колбу газ – колба

светодиодной лампы с последующим конвекционным охлаждением, что позволяет учитывать влияние каждого из участков на температуру GaN/InGaN кристаллов.

Практическая значимость работы заключается в разработке, создании и внедрении светоизлучающих устройств с улучшенными тепловыми параметрами.

Разработаны новые устройства светодиодной лампы, защищенные патентами на изобретения и полезные модели (Приложение А):

- 1) Светодиодная лента для лампы (2 варианта).
- 2) Светодиодный источник излучения.
- 3) Светодиодная лампа (2 варианта).
- 4) Светодиодный облучатель.

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении работ по федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» в рамках двух проектов:

1) «Разработка энергосберегающей светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания». Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57714X0061.

2) «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств». Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0266.

Результаты диссертационной работы так же используются в учебном процессе в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по дисциплине «Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий» для выполнения вычислительных экспериментов

бакалаврами направления подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», профиль «Технология электронных средств».

Методы исследования

Выполнение работы сопровождалось применением различных методов теоретического и экспериментального исследования. Для построения 3D-модели исследуемых объектов был использован метод твердотельного моделирования. Тепловые характеристики спроектированных компьютерных моделей были исследованы с помощью метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в системе автоматизированного проектирования (САПР) Ansys. Математические методы преобразования и решения уравнений, реализованные в программном комплексе MathCad, были использованы для описания физических принципов работы одного из вариантов предложенного технического решения. Для обработки экспериментальных данных были использованы методы математической статистики. Исследование тепловых характеристик макетных образцов проводилось контактным методом, а именно измерение температуры при помощи термопары К-типа.

Научные положения, выносимые на защиту

1) Математическая модель распределения температуры в конструкции GaN/InGaN кристаллы-подложка-газовая среда в колбе-колба светодиодной лампы позволяет учесть неравномерность расположения кристаллов на подложке, а также влияние на температуру кристаллов заполняющего колбу молекулярного и электронного газов.

2) Применение в конструкции лампы оптически прозрачной линзы из теплопроводящего материала позволяет одновременно снизить температуру светодиодных модулей до 10% и уменьшить неравномерность углового распределения силы света.

3) Введение источника свободных электронов, температурно-сопряженного со светодиодными модулями с последовательностями GaN/InGaN

кристаллов, позволяет до 15 % уменьшить температуру модулей в светодиодной лампе.

Степень достоверности и апробации работы

Результаты работы были представлены на различных научно-технических конференциях, среди которых:

- Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Россия, Томск 2015);
- Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Россия, Томск 2016 – 2020);
- Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Россия, Томск, 2016)
- Четырнадцатая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Россия, Новосибирск, 2018);
- Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Россия, Томск, 2016, 2018);
- Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Россия, Томск, 2019).

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 24 работах:

- две статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ;
- восемь статей, индексируемые реферативными базами данных Web of Science и Scopus;
- 14 докладов на всероссийских и международных конференциях;

По результатам исследований получено шесть патентов РФ на изобретение и полезные модели.

Личный вклад автора

Автором лично проведены создание математической модели распределения температуры в конструкции GaN/InGaN кристаллы-подложка-газовая среда колбы-колба светодиодной лампы, тепловой расчёт конструкций в программе «Ansys». Экспериментальные исследования проведены автором совместно с сотрудниками Научно-исследовательского института светодиодных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» и общества с ограниченной ответственностью «Руслед».

Также автор является исполнителем прикладных научных исследований и экспериментальных разработок, связанных с тематикой диссертации:

– «Разработка энергосберегающей лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания» 2014–2016 г.

– «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств» 2017–2020 г.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Объём работы составляет 113 страниц машинописного текста, включая 46 рисунков, 22 формулы, 12 таблиц и списка литературы из 134 наименований.

1 Состояние вопроса. Методы теплового анализа

1.1 Методы анализа теплопередачи: конвекции, излучения и теплопроводности

Теплопроводность – это способность тел проводить через себя тепловую энергию. Физической характеристикой теплопроводности является коэффициент теплопроводности (λ). Данный коэффициент показывает какое количество тепла протекает за единицу времени через тело единичной длины и площади при перепаде температур в один градус. Коэффициент теплопроводности зависит от химического состава, физического строения и агрегатного состояния вещества.

Теплопроводность в газах обусловлена переносом кинетической энергии движущихся молекул, поэтому значения коэффициентов λ малы, например, коэффициент теплопроводности воздуха при температуре 300 К и давлении 1 бар равен 0,0262 Вт/(м·°С). В жидкостях перенос тепла происходит по типу распространения продольных колебаний аналогично распространению звука, поэтому значения коэффициентов λ жидкостей больше, чем у газов. Например, теплопроводность воды при температуре 300 К равна 0,61 Вт/(м·°С). В металлах перенос тепла в значительной степени определяется переносом энергии свободными электронами. Например, теплопроводность алюминия при той же температуре равна 236 Вт/(м·°С).

Задачи определения передачи тепловой энергии между двумя телами, находящимися в соприкосновении, решаются в рамках теории теплопроводности. Изучаемые объекты считают однородными и изотропными. Процесс теплопередачи представляет собой изменение температуры в пространстве и времени, поэтому моделирование этого процесса сводится к нахождению функции от пространственных координат и времени. Распределение значений температур для всех точек моделируемого объекта называют температурным полем [25]. Такие поля разделяют на стационарные и нестационарные. Стационарное температурное поле характеризует температуру, которая постоянна во времени и зависит лишь от координат. В нестационарном же поле значение температуры изменяется как в пространстве, так и во времени.

Распространения тепловой энергии обеспечивает возникновение градиента температуры. На практике известно, что распространение тепла происходит от участков с большей температурой к участкам с меньшей температурой, причём направление распространения тепла посредством теплопроводности перпендикулярно изотермической поверхности.

Градиент температуры – это вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры, и применительно к декартовым координатам определяется как [24]:

$$\text{grad } T = \nabla T = 1_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + 1_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + 1_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1.1)$$

где $1_x, 1_y, 1_z$ – ортогональные между собой векторы единичной длины, направленные по координатным осям;

T – функция температуры от пространственных координат и времени.

Уравнение теплопроводности – дифференциальное уравнение второго порядка с частными производными, устанавливающее зависимость между температурой (T), временем (τ), и координатами тела (x, y, z) [23, 24]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T, \quad (1.2)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа;

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для твёрдых тел коэффициент температуропроводности вычисляется по формуле [24]:

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}, \quad (1.3)$$

где c – удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

γ – плотность тела, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Дифференциальное уравнение с источниками тепла внутри тела имеет вид [23]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{\omega}{c\gamma}, \quad (1.4)$$

где ω – удельная мощность источников (Вт/м³).

Решение уравнения типа (1.2) позволяет определить распределение температуры внутри исследуемого объекта в любой заданный момент времени. Для решения подобного уравнения обязательными параметрами являются начальное и граничное условия.

Температурное поле в нулевой точке по временной координате описывает начальное условие. Чаще всего, температурное поле в начальный момент времени при тепловых расчётах моделей объектов задают как равномерное.

Геометрия исследуемого объекта и правила взаимодействия окружающей объект среды составляют совокупность условий, которые и называют граничными. Такая совокупность условий задаётся следующими способами.

1) Граничное условие первого рода. Описывает температурное поле для поверхности тела в любой заданный момент времени.

2) Граничное условие второго рода. Описывает заданную плотность теплового потока каждой точки поверхности исследуемого объекта и является функцией времени. Для упрощения задач с тепловыми расчётами используют допущение о постоянстве плотности теплового потока. Физическим примером такого допущения является нагревание объектов в печах, в которых тепло главным образом передаётся посредством излучения по закону Стефана–Больцмана. В данном случае температура излучающих поверхностей много больше температуры исследуемого объекта.

3) Граничное условие третьего рода. Описывает закономерность теплообмена между поверхностями исследуемого объекта и окружающей средой посредством конвекции при постоянном потоке тепла. Таким образом, количество тепла $q_{\text{п}}$, передаваемого в единицу времени с единицы площади поверхностей тела

в окружающую среду с температурой T_c в процессе нагревания ($T_c > T_n$), прямо пропорционально разности температур между поверхностью тела T_n и окружающей средой [23]:

$$q_n = \alpha \cdot (T_c - T_n), \quad (1.5)$$

где α – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплообмена, Вт/(м²·К).

Также рассматриваемое граничное условие применяют для описания процессов нагревания и охлаждения тел посредством излучения. По закону Стефана–Больцмана поток тепла, передаваемого излучением от одной поверхности к другой, равен [23]:

$$q_n(t) = \sigma^* [T_n^4(t) - T_a^4], \quad (1.6)$$

где σ^* – приведённый коэффициент излучения;

T_a – абсолютная температура поверхности тела, принимающего тепло.

4) Граничное условие четвёртого рода. Описывает процесс теплообмена как между поверхностью исследуемого твёрдого объекта и окружающей средой, так и между соприкасающимися поверхностями исследуемых твёрдых объектов при условии равенства температур обеих поверхностей. При появлении в исследуемой системе потоков газа или жидкости считают, что обтекание поверхностей твёрдого объекта с передачей тепла от газа или жидкости происходит по закону теплопроводности [23]:

$$T_n(t) = [T_c(t)]_n \quad (1.7)$$

Советский теплофизик, профессор, академик и изобретатель Алексей Васильевич Лыков в своей монографии [23] приводит наиболее распространённые методы решения уравнения теплопроводности.

1.1.1 Классические методы решения дифференциального уравнения теплопроводности

1.1.1.1 Метод разделения переменных (метод Фурье)

Решение дифференциального уравнения теплопроводности разделяют на два этапа:

- 1) Находят совокупность таких частных решений T_n , которые будут удовлетворять заданным граничным условиям.
- 2) Определяют по принципу наложения общее решение уравнения, которое представляет собой сумму частных решений по следующей формуле:

$$T = C_1 T_1 + C_2 T_2 + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} C_n T_n, \quad (1.8)$$

где C_n – коэффициенты уравнения, определяемые из начального условия.

Применение метода Фурье позволяет составить уравнение, решение которого зависит от выбранных граничных условий. Однако для расчета температурного поля частным решением нельзя воспользоваться из-за невозможности определить постоянные коэффициенты частного решения. В таком случае для общего решения значения неизвестных коэффициентов определяются путем подбора для удовлетворения решения начальному условию. Это усложняет решение и увеличивает объем расчетов.

Рассмотренный метод больше всего подходит для решения одномерных задач, при определении симметричного температурного поля в неограниченной пластине, цилиндре, шаре.

1.1.1.2 Метод источников

Суть метода источников заключается в представлении любого процесса распространения тепла в теле теплопроводностью с помощью процесса выравнивания температуры, который возникает от множества элементарных источников тепла. Предполагают, что такие источники распределены в пространстве и во времени. В результате такого допущения задача теплопроводности может быть решена путем правильного выбора источников и их распределения в пространстве. Данный метод имеет объемный математический аппарат и применяется реже, чем метод Фурье.

1.1.2 Методы интегрального преобразования

1.1.2.1 Операционные методы

Операционный метод Хевисайда равнозначен методу интегрального преобразования Лапласа [23]. Метод состоит в преобразовании оригинала функции, с последующим изучением её изображения. Преобразование оригинала происходит путём домножения экспоненциальной функцией и интегрированием в пределах от нуля до бесконечности. Такое преобразование описывают следующей формулой [47]:

$$f_L(s) = L[f(\tau)] = \int_0^{\infty} f(\tau)e^{-s\tau} d\tau, \quad (1.9)$$

где $f_L(s)$, $L[f(\tau)]$ – изображение функции;

$f(\tau)$ – оригинал функции.

Для применения данного преобразования необходимо учитывать сходимость интеграла в формуле (1.3) – он должен сходиться. Иначе изображение функции не будет существовать. Это свойство накладывает некоторые ограничения на преобразуемую функцию. После нахождения решения в изображении выполняют обратный переход к оригиналу функции по формуле обратного преобразования. Возможно такое преобразование выполнять с помощью специальных таблиц [48, 49].

Данный метод обладает следующими преимуществами перед классическими методами:

- процесс применения метода однотипен для задач с различными граничными условиями и применим к телам различной геометрии;
- облегчает решение для задач с простейшими начальными условиями;
- наиболее эффективен при решении задач для объектов с полуограниченной или неограниченной протяженностью.

Метод не подходит для решения задач с функциональной зависимостью начальных условий в пространственных координатах и для решения многомерных

задач, так как нахождение решения таких уравнений теплопроводности затруднено определением оригинала по полученному изображению.

1.1.2.2 Конечные интегральные преобразования

Данная группа методов появилась в результате развития интегральных преобразований и требовалась для решения уравнений при заданной (конечной) области. Впервые основы метода были предложены Н.С. Кошляковым, а полностью доработаны Гринбергом, Дейчем, Трантером Снеддоном, и др. В сравнении с классическими методами, описанными в пункте 1.1.1 диссертационного исследования, метод конечных интегральных преобразований даёт возможность определить закономерности протекания физических процессов посредством анализа полученного решения исследуемой физической величины. Также преимущество метода заключается в упрощении решения для систем дифференциальных уравнений в частных производных. Вследствие преобразований вместо системы уравнений с частными производными получают систему обыкновенных дифференциальных уравнений (с учетом начальных условий).

1.1.3 Методы численных решений

1.1.3.1 Метод конечных разностей (МКР)

Метод состоит в замене производных их приближённым значением. Выражают приближённые значения посредством разности значений функции в отдельно взятых точках исследуемого объекта, которые называют узлами сетки. Такие эквивалентные соотношения в конечных разностях заменяют исходное дифференциальное уравнение. Последующее решение заключается в выполнении элементарных алгебраических операций. Такие операции повторяются при расчёте температурных полей, что создаёт возможность алгоритмизации процесса и реализации расчётов посредством вычислительной техники. Данное преимущество сделало применение сеточных методов, к которым и относится МКР, самыми

перспективными для задач теплопереноса. Также метод сеток позволяет успешно работать с одномерными, двух- и трехмерными задачами.

На момент издания книги автор пишет: «Численные методы решения имеют большие потенциальные возможности, однако до последнего времени их широкое применение к решению уравнений переноса сдерживалось большим объемом вычислительной работы. Быстрое развитие и распространение счетнорешающей техники кардинально меняет их роль в исследовании явлений переноса.» [23, с. 66]. Такой прогноз был полностью оправдан, так как метод сеток, уже в усовершенствованном виде, используется инженерами в современных средствах автоматизированного проектирования (САПР).

1.1.3.2 Электрическая аналогия

На практике тепловые расчеты выполняют чаще всего с помощью тепловых схем замещения. Метод основан на аналогии дифференциальных уравнений теплопроводности и уравнений электропроводности [50].

Тепловая схема строится по принципу схемы электрической. Вместо непрерывно распределённых тепловых источников и тепловых параметров составляется сетка, содержащая поверхностные сопротивления и внутренние сопротивления между узлами. При возрастании количества узловых точек, увеличивается точность решения. Тепловая напряжённость всего устройства либо её отдельных участков может быть определена и по упрощённой тепловой схеме с малым количеством узлов. Такой метод решения тепловых задач обладает возможностью определять среднюю температуру части объекта, принятой за однородное тело.

Метод тепловых схем замещения обладает следующими недостатками:

– влияние на точность оказывают коэффициенты различных тепловых параметров, например, теплопроводность материала, коэффициент теплоотдачи поверхности, и т.п. Такие параметры вкладывают в исходные данные некую степень неопределённости;

– для решения трехмерных задач метод можно рассматривать в качестве приближенного.

1.1.3.3 Метод конечных элементов (МКЭ)

Метод конечных элементов впервые был применен в инженерной практике в начале 50-х гг. XX в. [51].

Современная концепция МКЭ была предложена в 1956 г. учёными М. Тэнером, Р. Клаффом, Г. Мартиным, Л. Топпом при решении задач теории упругости. В 1960 г. появилось само название метода, а в 70-х математическая теория. Среди известных работ выделяются исследования И. Бабушки, Г. Стренга, Дж. Одена, Дж. Фикса, Р. Галлагера. Также свой вклад в развитие метода внесли отечественные учёные. В. Г. Корнеев, Л. А. Розин работали над математическими основами МКЭ и вариационно-разностного метода (ВРМ) и указали на их сходства.

Суть метода заключается в замене дифференциальных уравнений системой алгебраических уравнений. Исследуемый объект (одно-, двух- или трехмерный), разбивается на малые, имеющие конечные размеры, подобласти. Полученные подобласти называют конечными элементами (рисунок 1.1), а процесс разбивки – дискретизацией. В узлах полученной сетки значение непрерывной величины считается переменной. Для каждого элемента непрерывная величина аппроксимируется с помощью полинома, подобранного таким образом, чтобы непрерывность величины сохранялась вдоль границ элемента. Увеличивая только число конечных элементов не всегда возможно повысить точность расчета. Способ дискретизации области на элементы, вид аппроксимирующих функций задают точность расчета.

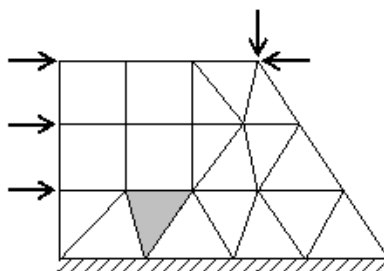


Рисунок 1.1 – Пример дискретизации области

МКЭ выделяется среди остальных численных методов универсальностью и гибкостью при описании рассчитываемой области, её геометрии и граничных условий. Самые современные САПР, такие как ANSYS, SolidWorks, NX, CATIA, Autodesk, COMSOL и др., используют МКЭ для расчётов в строительстве и машиностроении [52-55], гидро- и аэродинамике [56-58], теплопроводности [59-62], фильтрации, распространении волн и др. [63-68].

Таким образом из перечисленных методов решения дифференциального уравнения теплопроводности наиболее распространённым и реализованным в САПР является метод конечных элементов. Данный метод полностью подходит для решения задач диссертационного исследования, а именно моделирования конструкции светодиодной лампы и решения задач по обеспечению теплового режима последовательности GaN/InGaN кристаллов, применяемых в светоизлучающих устройствах. Краткое сравнение ключевых особенностей рассмотренных методов выполнено автором и описано в работе [69].

Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) позволяют решать данные задачи. Спроектировав конструкцию устройства и задав необходимые параметры материалов для расчёта, возможно получить распределение температуры по всей конструкции в любой момент времени. Иными словами, процесс составления и решения дифференциального уравнения теплопроводности с уравнениями начальных и граничных условий автоматизирован и выполняется для конструкций различной сложности.

Необходимо с помощью САПР, основанной на МКЭ, построить тепловую модель светодиодной лампы и светодиодного модуля. Необходимо будет учесть восемь светодиодных нитей, каждая из которых содержит последовательность полупроводниковых кристаллов, представляющих источники тепла и света. Пространственная конструкция из СДМ расположена в закрытом объёме колбы лампы, заполненным газом.

1.2 Методы обеспечения теплового режима светодиодных ламп

1.2.1 Конструкции светодиодных ламп

Продолжительный период времени конструкция светодиодных ламп была типовой: один или несколько мощных SMD-чипов с кристаллами из нитрида галлия, покрытыми люминофорной композицией, размещались на металлической плате [70, 71]. Плата закреплялась на массивном радиаторе для большего теплоотвода от светоизлучающего модуля. Устройство питания занимало весь цоколь и нижнюю часть лампы (например, [72]). Данная конструкция совершенствовалась со временем, и на данный момент лампы такого типа сохранили светодиодный модуль с SMD-чипами на металлической плате и миниатюрным драйвером в цоколе. Из конструкции лампы исключили металлический радиатор, тем самым проблема с отводом тепла осталась не решённой. Срок службы ламп этого типа определяется в основном эффективностью отвода тепла от сильно нагревающихся светодиодных чипов (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Фотографии ламп со светодиодными чипами

Лампы подобной конструкции обладают несколькими недостатками. Во-первых, высокая температура мощных SMD-чипов. Как следствие лампы недолговечны, так как использование металлического радиатора приемлемых для бытовой лампы размеров было недостаточным для эффективного отведения тепла. Второй недостаток – это распределение светового потока только в пределах 160° относительно продольной оси лампы. Эта проблема частично была решена с появлением светодиодных ламп типа "кукуруза" (рисунок 1.3), но в таких лампах

проблема теплоотвода становится еще более острой из-за увеличенного количества SMD-чипов и отсутствия радиатора.



Рисунок 1.3 – Фотография лампы типа «кукуруза»

Указанные недостатки ламп на светодиодах являются ключевыми, что ставит под сомнение перспективность таких конструкций, поэтому в настоящей работе исследуются более перспективные конструкции ламп с нитевидными излучающими модулями.

Новым этапом развития светодиодных ламп стала конструкция с использованием с использованием излучающих модулей в виде светодиодных нитей (Filament LED Bulb) [73]. Конструкция данного типа лампы (рисунок 1.4) включает стеклянную колбу и металлический цоколь. Внутри цоколя располагается миниатюрный источник питания (ИП) светоизлучающих модулей, которые приварены к металлическим контактам внутренней конструкции, расположенной на стеклянной ножке.



Рисунок 1.4 – Лампа с нитевидными излучающими модулями

СДМ сконструированы по технологии «COB (chip-on-board)» из металлического, сапфирового или керамического основания, на котором расположена последовательность светоизлучающих кристаллов GaN/InGaN. СДМ покрыт люминофорной композицией, состоящей из оптически прозрачного компаунда и люминофорного порошка (рисунок 1.5). Модули в лампе электрически соединены между собой по последовательно-параллельной схеме.

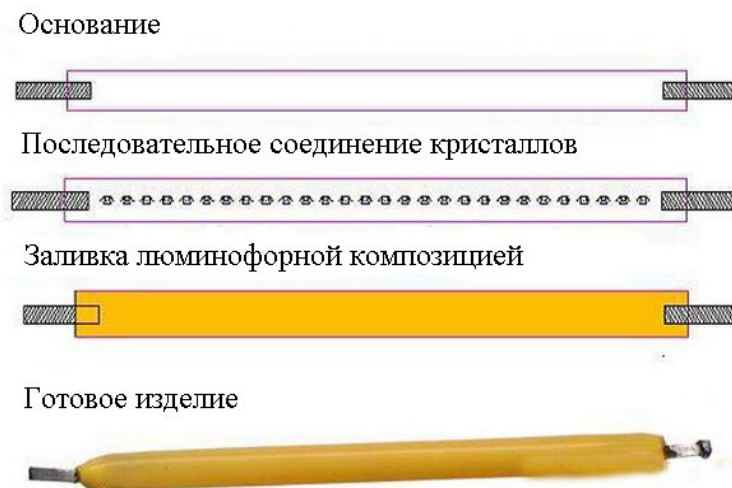


Рисунок 1.5 – Конструкция СДМ

Колба лампы заполнена газом, что позволяет снизить температуру СДМ за счёт естественной конвекции гелия внутри колбы [15, 74, 75]. Такие лампы обладают несколькими преимуществами по сравнению со светодиодными лампами на SMD-светодиодах.

Во-первых, производители ламп накаливания могут переоборудовать производство на выпуск светодиодных ламп с меньшими затратами. Это связано с конструкцией лампы – она основана на конструкции лампы накаливания, так как базовые части (такие как колба, штенгель и стойка сердечника) остаются неизменными либо требуют небольших модификаций.

Во-вторых, распределение света в лампе ближе к сферическому (чем у ламп со светодиодами) и поддаётся корректировке за счёт, например, пространственного изменения расположения СДМ [76] или других конструктивных особенностей. В лампах с SMD-светодиодами эта возможность ограничена из-за использования

массивного радиатора, препятствующего распространению света за его пределы и создающего тем самым неосвещенные области, а также расположения светодиодов в одной плоскости.

Разнообразное расположение светодиодных модулей к появлению большого количества вариантов ламп, используемых для декоративных целей (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Разновидности ламп с нитевидными СДМ

Эти особенности ламп на основе светодиодных нитей привлекли большое внимание многих производителей источников света, в том числе и в России [77].

1.2.2 Значимость теплового режима

От выбранного теплового режима зависит световой поток и срок службы светодиода [12-21, 37, 38, 45]. Так, например, для мощных светодиодов компании CREE была проанализирована зависимость светового потока и срока службы от рабочей температуры (рисунок 1.7) [12]. В работе описаны испытания светодиодов серии XPG при температурах в «точке пайки» равных 55, 85 и 105 °С. На графике время испытаний отмечено как LM-80, снижение светового потока в процессе наработки как TM-21. Авторы делают вывод, что разница в сроке службы светодиода при работе на 85 и 105°С составляет 200 тысяч часов.

В работе [13] показано, что снижение рабочей температуры светодиода даже на 1°C приводит к увеличению срока службы на несколько тысяч часов.

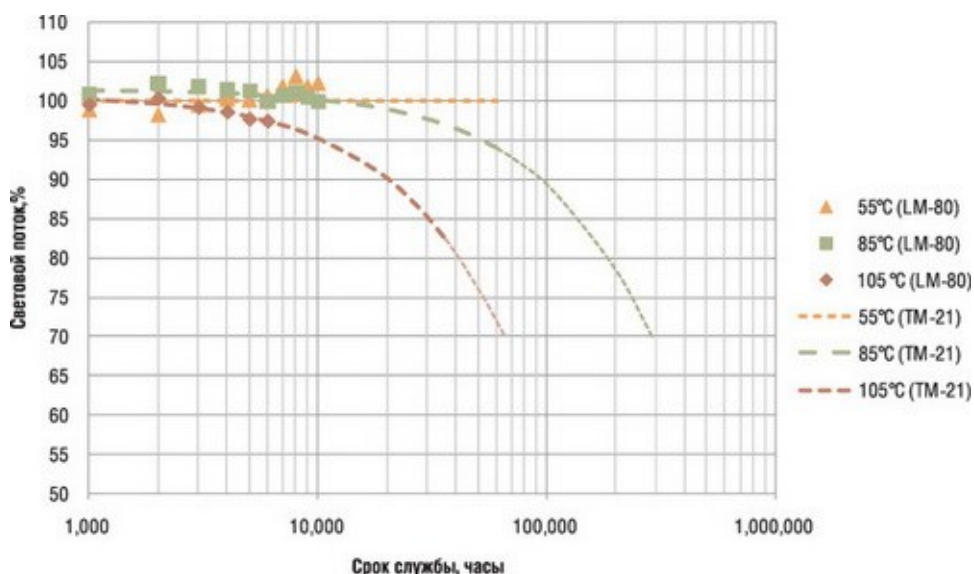


Рисунок 1.7 – Зависимость светового потока и срока службы светодиода от температуры

При работе устройства в условиях повышенных температур активизируются различные физико-химические механизмы деградации, среди которых авторы работ [78-84] выделяют:

- механические напряжения в структуре полупроводника;
- образование вакансий азота вследствие разрыва связей Ga-N в активной области кристалла;
- изменение сопротивления р-контактной области структуры полупроводника в связи с процессами интердиффузии и межфазными химическими реакциями;
- миграция индия и магния в активной области полупроводника;
- перераспределение профиля водорода в структуре полупроводника;
- распад активатора люминофора (Ce) при температурах выше 120 °C;
- ускорение деградация кристаллической структуры барьеров «КЯ – барьерный слой» за счет образования электрически активных дефектов в виде

полных и частичных дислокаций на межфазных границах, а также преципитатов индия в квантовых ямах как второй фазы;

– эффект стягивания тока «Current crowding» под омическими контактами кристалла.

Для светодиодной лампы наиболее характерны виды деградации связанные с перегревом р-п перехода кристаллов и не корректными электрическими режимами, по данным от производителей известно, что 50% брака связано с выходом из строя СДМ и 50% с источниками питания.

В конечном итоге деградация светодиодных кристаллов и СДМ приводит к увеличению вероятности локального перегрева и преждевременного выхода из строя. Во избежание перегрева СДМ в светодиодной филаментной лампе применяют различные методы для увеличения теплоотвода от источников тепла – светодиодных кристаллов на основе InGaN/GaN, среди которых можно выделить следующие наиболее значимые.

1.2.3 Обеспечение теплового режима увеличением теплопроводности материалов

Известна светодиодная лампа, содержащая колбу, в которой размещен держатель со штенгелем и стойкой сердечника, на которой закреплена объемная излучающая свет конструкция из светодиодных модулей, цоколь и устройство питания, установленное в цоколе и электрически соединенное с ним и светодиодными модулями [73]. Колба заполнена газом для конвекционного охлаждения СДМ.

В статье [15] авторы представляют результаты исследования максимальной температуры кристаллов лампы с четырьмя СДМ при изменении материала подложки СДМ и заполняющего колбу лампы газа (таблица 1.1). Исследованы конструкции СДМ с подложками из стекла, прозрачной керамики, сапфира и меди. В качестве заполняющего колбу газа были взяты воздух, азот и гелий. Наименьшую температуру кристаллов показало сочетание медной подложки СДМ и гелия.

Таблица 1.1 – Результаты моделирования средней температуры перехода светодиодных кристаллов с различными заполняющими колбу лампы газами и материалами подложки

Средняя температура перехода	Стекло	Прозрачная керамика	Сапфир	Медь
Воздух	187,1	173,6	169,0	155,5
Азот	178,3	167,1	162,4	149,1
Гелий	125,8	116,2	114,4	103,4

1.2.4 Изменение размеров конструкций светодиодного модуля и лампы

В статье [17] авторы приводят результаты моделирования светодиодной филаментной лампы с четырьмя СДМ и увеличенными размерами колбы (таблица 1.2), увеличенным размером люминофорной композиции СДМ (таблица 1.3), особой формой люминофорной композиции СДМ (таблица 1.4).

Таблица 1.2 – Результаты моделирования для увеличенной колбы

Увеличение колбы	$T_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$
Без увеличения	145
Увеличенная на 2 мм	140
Увеличенная на 4 мм	135

Увеличение колбы на четыре миллиметра в диаметре позволило снизить температуру СДМ на 10°C , а увеличение диаметра люминофорной композиции (d) с двух до пяти миллиметров дало снижение температуры на 24°C

Таблица 1.3 – Результаты исследования для увеличенного диаметра люминофорной композиции

d, мм	T _{макс} , °C
2	145
3	133
4	126
5	121

Также авторы изменили форму люминофорной композиции (I_{fin}), увеличив тем самым площадь поверхности рассеяния тепла (рисунок 1.8), и получили снижение температуры на 10 °C.

Таблица 1.4 – Результаты исследования для увеличенного диаметра люминофорной композиции

I_{fin} , мм	T _{макс} , °C
0	145
0,61	138
0,91	135

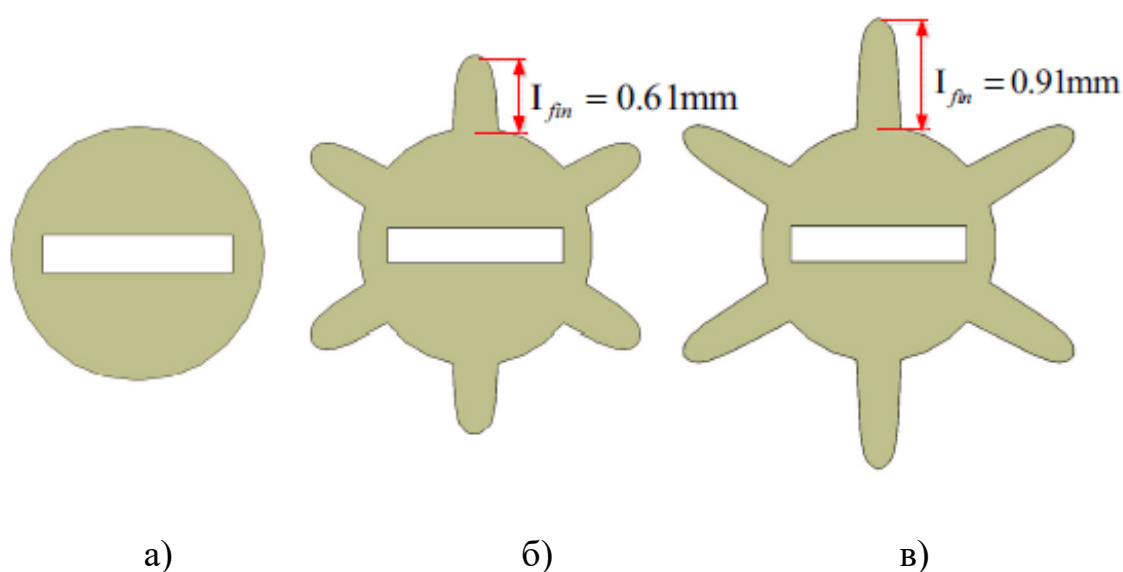


Рисунок 1.8 – Изменение формы люминофорной композиции

В работе [17] зависимость светового потока от толщины люминофорной композиции не рассматривалась.

Представленная на рисунке 1.8 форма люминофорной композиции с увеличенной площадью рассеяния тепла частично решает задачу снижения температуры СДМ, однако, выполнить подобную форму композиции технологически невозможно. В серийном производстве используют автоматы диспенсерного нанесения композиции. От использования заливочных форм производители отказываются из-за высокой степени адгезии силиконового компаунда к формам из любого материала. Прилипая к форме, композиция «рвётся» и приводит изделие в негодность.

Таким образом, задача отведения тепла от СДМ светодиодной лампы решена не окончательно.

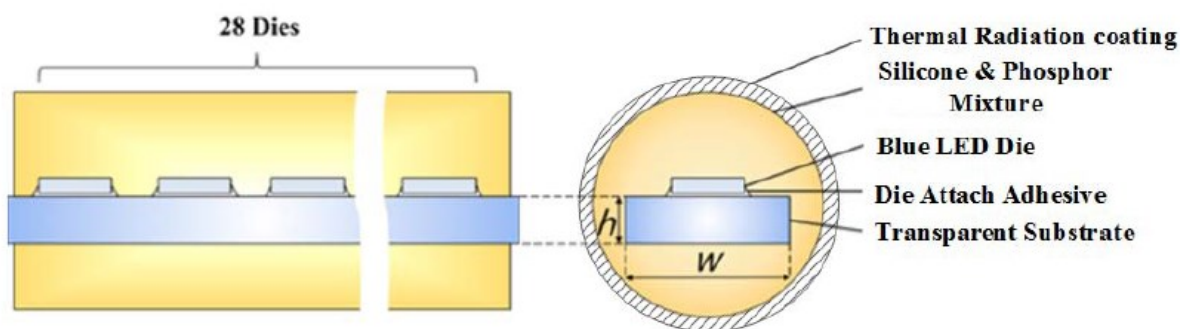
1.3 Неравномерность температурного профиля

1.3.1 Общие сведения

Описанная в пункте 1.2.1 диссертации конструкция СДМ содержит на подложке от 25 до 30 кристаллов GaN/InGaN планарного типа. Кристаллы расположены на одинаковом расстоянии друг от друга и распределены равномерно по поверхности подложки. В статье [21] представлены результаты эксперимента, показывающие неравномерность нагрева подложки кристаллами в рабочем режиме. Центральная часть подложки нагревается сильнее, что может приводить к локальному перегреву кристаллов и выходу их из строя. Учитывая последовательное электрическое соединение кристаллов, поломка даже одного элемента цепи приведёт к полной неработоспособности всего СДМ.

1.3.2 Снижение температуры светодиодного модуля теплоизлучающим покрытием

В работе [18] показаны результаты исследования двух конструкций СДМ (рисунок 1.9). Первая конструкция полностью окружена люминофорной композицией. Поверх композиции нанесено включающей теплоизлучающее покрытие. Вторая конструкция содержит люминофорную композицию, нанесённую только поверх массива излучающих кристаллов. На нижнюю сторону подложки СДМ и люминофорную композицию нанесено теплоизлучающее покрытие.



a)

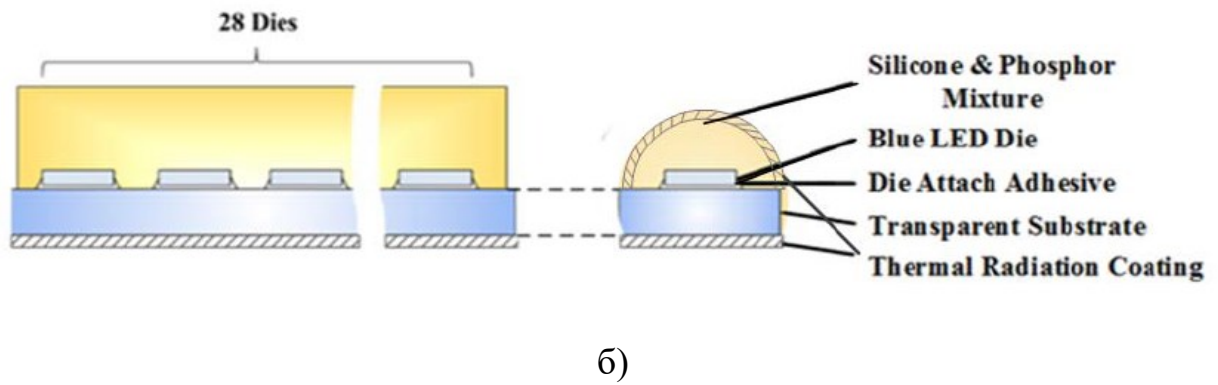


Рисунок 1.9 – Два варианта моделей СДМ с нанесением теплоизлучающего покрытия

Данное покрытие снизило неравномерность распределения температуры на поверхности люминофорного слоя (рисунок 1.10), и снизило общую температуру СДМ в пределах 10%.

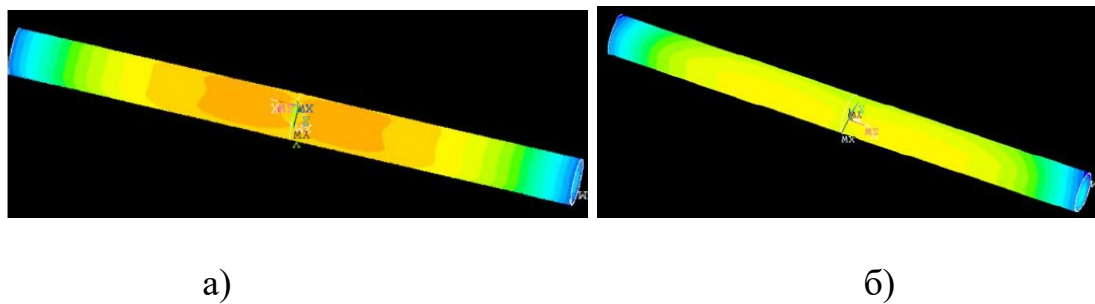


Рисунок 1.10 – Тепловое распределение конструкции СДМ № 1 без покрытия (а) и с покрытием (б)

Представленные же картины теплового распределения конструкции СДМ № 2 показали, что неравномерность температуры в слое подложки устранить не удалось (рисунок 1.11).

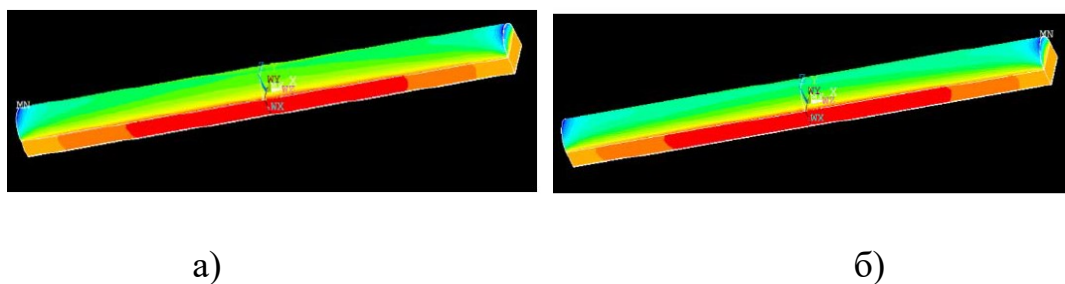


Рисунок 1.11 – Тепловое распределение конструкции СДМ № 2 без покрытия (а) и с покрытием (б)

Использование теплоизлучающего покрытия также позволяет снизить температуру СДМ и уменьшить неравномерность распределения температуры на поверхности люминофорной композиции. Неравномерность же теплового распределения внутри конструкции СДМ не изменилась, что видно из рисунка 1.11.

1.3.3 Распределение кристаллов по подложке

В работах [19-22, 85] описаны результаты исследований, направленных на повышение равномерности температурного профиля по длине подложки СДМ, достижения равенства температур кристаллов и снижения общей температуры СДМ.

Авторы изготовили макетные образцы и провели следующий эксперимент: «Светодиодные модули изготовлены на подложке длиной $L = 18$ мм из никелированной стали. Все светодиодные кристаллы в количестве 14 шт. смонтированы на подложку с помощью теплопроводящего клея и электрически соединены последовательно друг с другом. В стационарном тепловом режиме, спустя 5 минут после подключения источника к испытываемому образцу, проводилась регистрация температурного профиля светодиодного линейного модуля с помощью тепловизора (FLIR SC7700M, разрешение 640x512 пикселей). Температура окружающей среды 23°C . В режиме реального времени с частотой 380 Гц в полнокадровом режиме велась съемка термографической картины.» [19].

Сравнивались два образца светодиодных лент:

- образец 1: прямой ток $I = 5$ мА, равномерное расположение кристаллов (прототип);
- образец 2: прямой ток $I = 5$ мА, расстояние между кристаллами изменяется вдоль продольной оси подложки от значения $1,5 \cdot L / (N-1)$ между центрами кристаллов в середине подложки до значения $0,5 \cdot L / (N-1)$ на ее концах.

Результаты эксперимента приведены на рисунке 1.12. В предложенной конструкции светодиодной ленты градиент температуры вдоль продольной оси

подложки в шесть раз, а средняя температура подложки на три градуса меньше, чем у прототипа.

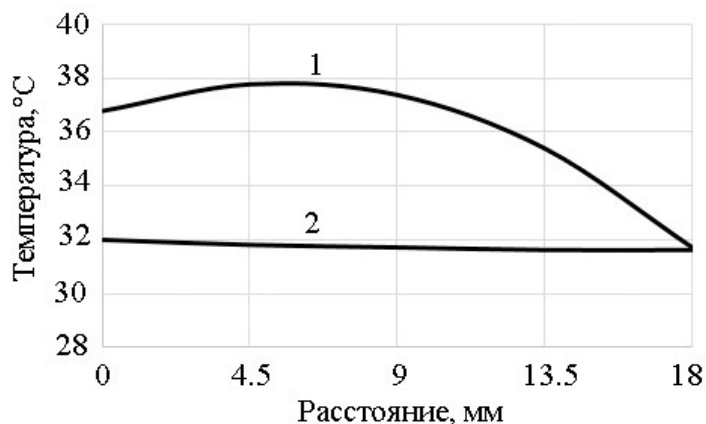


Рисунок 1.12 – Температура вдоль продольной оси подложки

Таким образом, рассмотренные конструктивные решения позволяют снизить температуру СДМ, но в случае с теплопроводящим покрытием не уменьшают неравномерность распределения температуры. Конструкция СДМ с распределённым расположением кристаллов позволила как снизить температуру устройства, так и увеличить равномерность распределения температуры и может быть использована в конструкции светодиодной лампы. В указанных работах не оценена эффективность применяемого подхода снижения температуры и выравнивания температурного профиля СДМ при использовании разработанных СДМ в светодиодных лампах.

В связи с этим задача оценки эффективности применения в светодиодных лампах конструкции СДМ с распределёнными по подложке кристаллами является актуальной.

1.4 Теплоперенос в колбе в дополнение к конвекции

1.4.1 Активное охлаждение потоком ионов

Авторы статьи [16] в качестве метода охлаждения СДМ используют направленный поток ионов, создаваемый высоковольтным источником постоянного напряжения. Исследователи встроили в лампу электроды в форме иглы на расстоянии 12 мм друг от друга и прикладывали к ним напряжение от шести до девяти киловольт. Таким образом удалось добиться снижения температуры СДМ на $13,5 \pm 1,5$ °С и максимальной скорости потока ионов равной 0,4 м/с. Измерение температуры проводилось с помощью тепловизионной съёмки через специально проделанное отверстие в стеклянной колбе лампы.

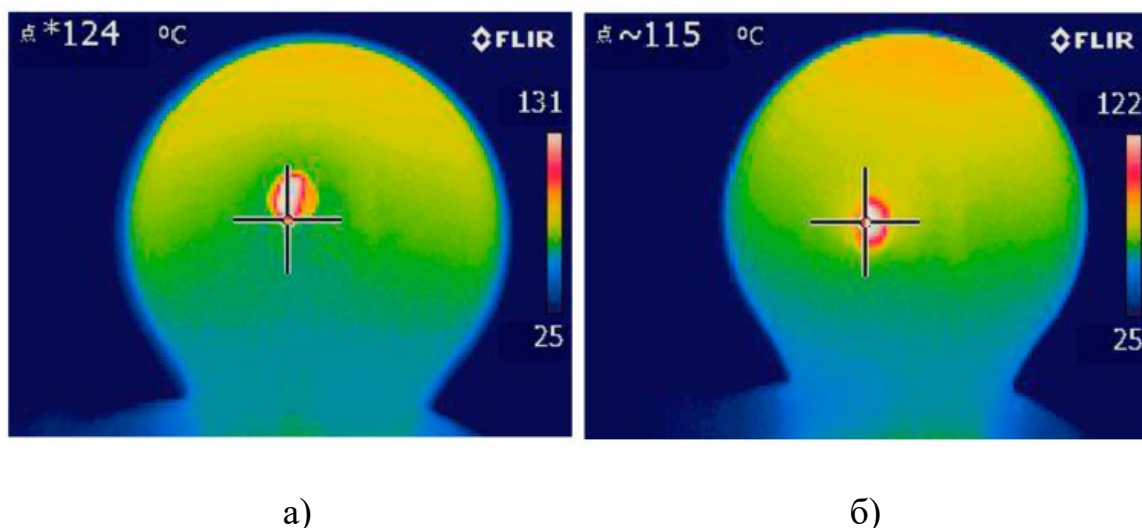


Рисунок 1.13 – Температура СДМ без воздействия потока ионов (а), температура СДМ с воздействием потока ионов при напряжении 7 кВ на электродах

1.4.2 Увеличение коэффициента конвекции за счёт отверстий в колбе

В работе [18] авторы сравнивают влияние коэффициентов излучения и конвекции на максимальную температуру СДМ (рисунок 1.14). Исследователи приходят к выводу, что комбинация двух подходов, увеличение коэффициентов конвекции и излучения, даст снижение максимальной температуры устройства на 30% и более в сравнении с выпускаемой серийно конструкцией.

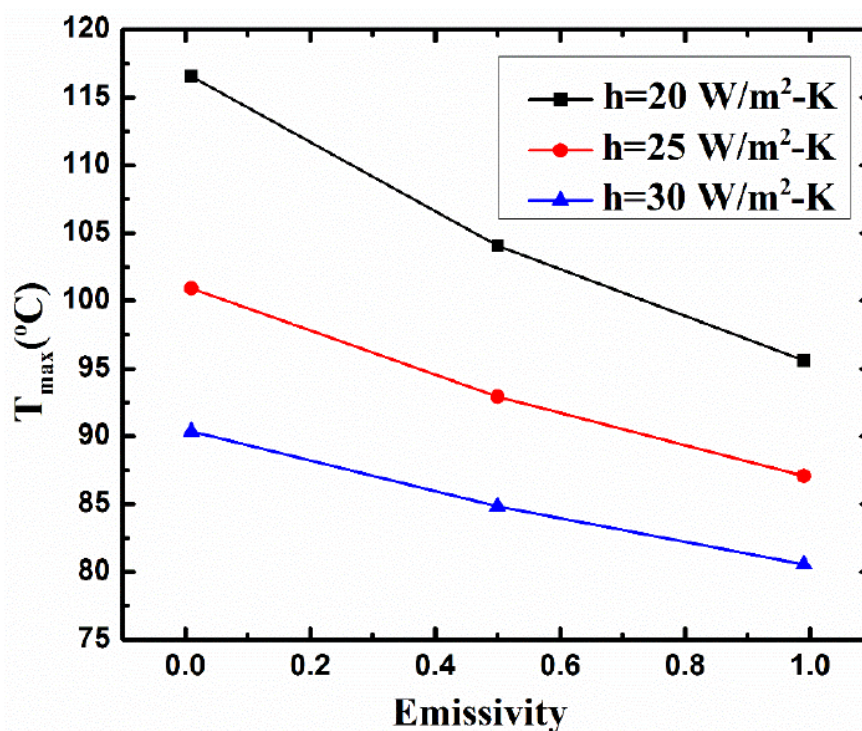


Рисунок 1.14 – Зависимости максимальной температуры СДМ от коэффициентов конвекции и излучения

Для увеличения коэффициента излучения предложено теплоизлучающее покрытие собственной разработки, которое наносится поверх люминофорной композиции (конструкция и результаты описаны в пункте 1.3.2 диссертации). Для повышения коэффициента конвекции предложено использовать отверстия в колбе лампы. Экспериментальное исследование данного предложения авторами не представлено.

Использование потока ионов для охлаждения СДМ дало результат в виде снижения температуры на 13 °С. При этом в колбу лампы были внедрены электроды и подключены к высоковольтному источнику питания. Такой подход интересен в исследовательском плане, но неосуществим в серийно выпускаемых конструкциях.

Подход, использующий увеличение коэффициентов излучения и конвекции, также даёт требуемый результат снижения максимальной температуры СДМ. Если увеличение коэффициента излучения путём добавления на поверхность СДМ специального покрытия авторами исследования [18] подтверждено, то увеличение

коэффициента конвекции при помощи добавления отверстий в колбу лампы выдвинуто в качестве предложения. Во-первых, недостаток данного предложения состоит в замене охлаждающей газовой среды внутри лампы на воздушную среду. Известны результаты моделирования [15], в которых показано, что максимальная температура СДМ на воздухе выше на десятки градусов, чем в среде гелия (таблица 1.1). Во-вторых, увеличение коэффициента конвекции путём выполнения отверстий в колбе предполагает наличие постоянного движения воздуха в окружающей среде. В таком случае использование ламп данной конструкции в закрытых помещениях ограничено. Иначе добиться снижения температуры в воздушной среде превосходящее такое снижение в среде гелия для данной конструкции лампы невозможно.

Таким образом представленные подходы не полностью решают задачу снижения температуры устройства.

1.5 Цель и задачи исследований

В результате проведённого анализа исследований различных коллективов авторов выяснено, что работы по обеспечению теплового режима СДМ в светодиодных лампах являются актуальными. Задачи снижения максимальной температуры СДМ решены не окончательно.

Целью работы является обеспечение теплового режима светодиодного модуля на основе GaN/InGaN кристаллов в светодиодных лампах.

В настоящей работе достижение цели ограничено решением следующих задач:

- 1) Разработка модели светодиодной лампы с нитевидными светодиодными модулями, позволяющей изучение её тепловых характеристик.
- 2) Применение разработанной модели для анализа температурных полей в структуре нитевидного светодиодного модуля и светодиодной лампы и разработка новых технических решений с улучшенными тепловыми свойствами.

2 Моделирование светодиодной лампы с нитевидными светодиодными модулями

2.1 Среда моделирования

Для разработки тепловой модели и исследования тепловых характеристик СДМ и светодиодных ламп был выбран универсальный программный комплекс, включающий модуль анализа по МКЭ «ANSYS». С 1970-х годов ведется работа над улучшением программы и в настоящий момент ей пользуются инженеры из различных сфер деятельности для выполнения расчётов различных моделей:

- при изучении деформаций твёрдых тел, механики конструкций;
- при расчётах движения потоков газа и жидкости;
- при решении задач теплообмена и нахождения теплового поля в стационарном тепловом режиме;
- при расчётах электродинамических и акустических моделей.

Построение тепловых моделей в программной среде ANSYS можно разделить на несколько этапов:

1) Создание конструкции 3D-модели исследуемого объекта с помощью встроенного графического редактора. Функционал редактора позволяет строить из простых геометрических фигур объёмные элементы конструкции, различным образом совмещать, разделять и придавать необходимую форму.

2) Дискретизация 3D-модели. На данном этапе на построенную модель исследуемого объекта происходит наложение сетки, разбивающей конструкцию на конечные элементы. Количество элементов на которое необходимо разбить объект выбирают исходя из сложности геометрии объекта, его размеров, требуемой точности последующих расчётов, производительности вычислительной машины. Разбивку можно выполнять как вручную, задав необходимое число конечных элементов, их форму, так и в автоматическом режиме.

3) Создание граничных условий. Каждой части 3D-модели задаются свойства того материала, из которого состоит реальный объект. Можно выбрать материал из библиотеки либо создать новый с необходимыми свойствами. Затем

задаются условия генерации тепла и теплообмена для элементов модели. Программа позволяет учесть конвекцию, излучение и передачу тепла теплопроводность между соприкасающимися телами.

4) Расчёт. Последний этап построения тепловой модели – настройка отображения результатов расчёта. Предлагаемые программой инструменты позволяют настроить отображение теплового распределения как на поверхности изучаемого объекта, так и внутри него. Есть возможность регулирования пределов и шага цвето-температурной шкалы.

2.2 Описание моделей

2.2.1 Разработка модели нитевидного светодиодного модуля

Источниками тепловой энергии в светодиодной лампе являются СДМ. В связи с этим необходимо на первом шаге разработать тепловую модель нитевидного светодиодного модуля.

Модели СДМ (рисунок 2.1) состоит из основания с выводами, полупроводниковых кристаллов, смонтированных на основание при помощи клея, и люминофорной композиции.

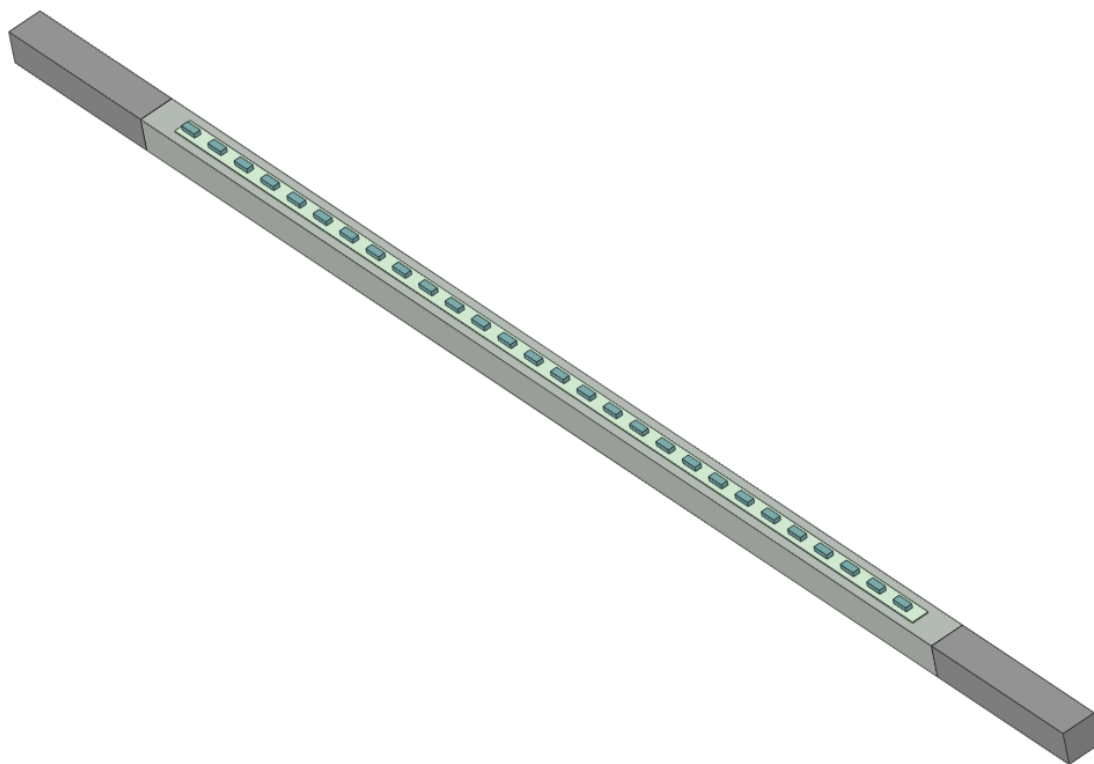


Рисунок 2.1 – Модель СДМ (без люминофорной композиции)

Основание в виде модули имеет размеры $30 \times 1 \times 1$ мм и выводы по 5 мм с каждой стороны. На поверхность основания нанесён слой теплопроводящего клея с размерами $28 \times 0,7 \times 0,03$ мм. Полупроводниковые кристаллы планарного типа с размерами $480 \times 200 \times 130$ мкм расположены в количестве 28 штук на клеевом слое таким образом, чтобы длинная сторона кристалла была сонаправлена с длинной стороной основания. Основание с кристаллами окружено люминофорной композицией в форме цилиндра с диаметром 1,7 мм и длиной 30 мм (рисунок 2.2).

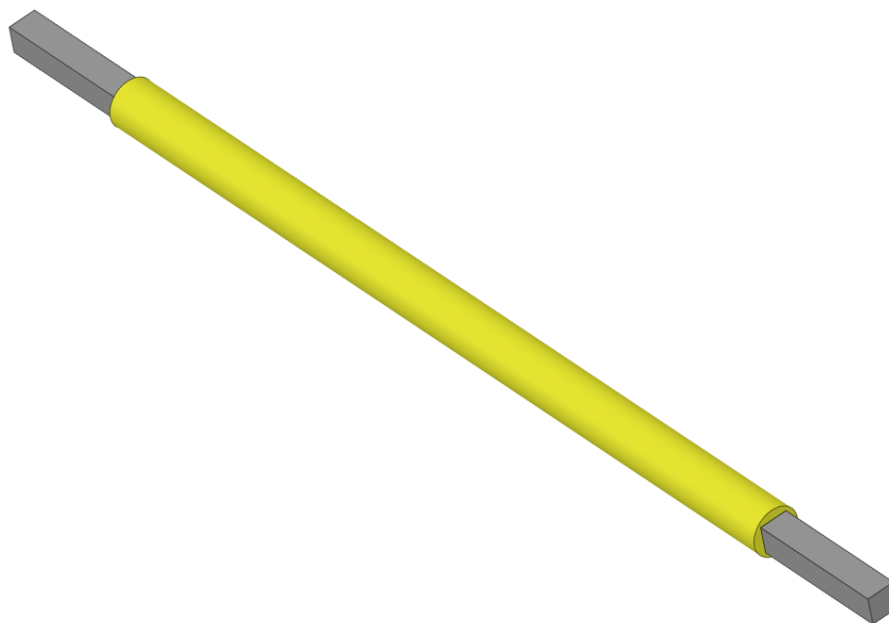


Рисунок 2.2 – СДМ со слоем люминофорной композиции

Коэффициенты теплопроводностей используемых материалов взяты из справочных данных [86-97] и приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения коэффициентов теплопроводностей материалов модели СДМ

Компонент СДМ	Материал/марка	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Основание	Сталь	60
Клей	Dow Corning	1,7
Компаунд	Силиконовый эластомер	0,15
Кристалл	InGaN/GaN	40

Используемые полупроводниковые кристаллы ES-EABCF08Q фирмы Epistar сконструированы на основе нитрида галлия и обладают синим цветом свечения. Кристаллы такого типа представляют собой комбинацию слоёв из различных материалов. Пример структуры светодиодного кристалла на основе InGaN/GaN приведён на рисунке 2.3 [98].

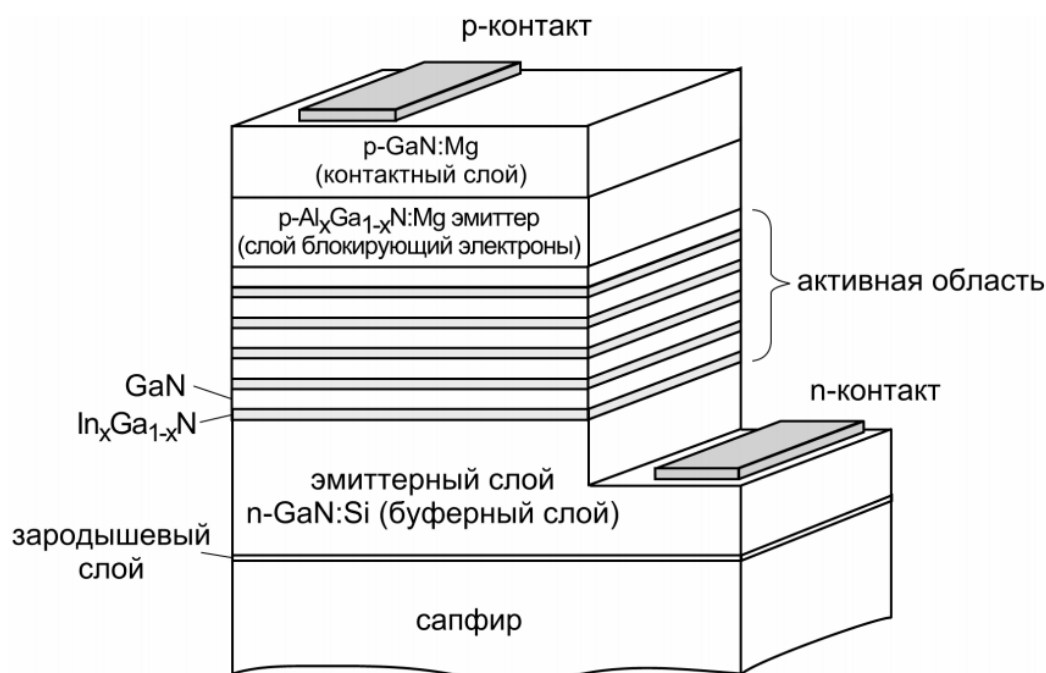


Рисунок 2.3 – Схематичное изображение светодиода InGaN/GaN, изготовленного на сапфировой подложке

Значения теплопроводности слоёв структуры кристалла лежат в пределах от 8 до 210 Вт/(м·К) [90-97]. Исходя из данных, представленных в исследовании InGaN/GaN гетероструктур [94], средняя теплопроводность гетероструктуры в диапазоне температур от 250 до 500 К соответствует значению 40 Вт/(м·К).

КПД кристаллов составляет 45–50 % [99-101], поэтому в дальнейших расчётах в качестве источника тепловыделения использована половина мощности, потребляемой в рабочем режиме СДМ, которая равняется 0,375 Вт, поскольку одна линейка с 28 полупроводниковыми кристаллами в рабочем режиме потребляет 0,75 Вт электрической мощности.

Теплопередача в построенной модели выглядит следующим образом. В качестве источников тепла выступают полупроводниковые кристаллы. Генерация тепла равномерно распределена между ними и составляет 13,4 мВт для каждого кристалла с учётом их КПД. Сгенерированное кристаллами тепло передаётся соприкасающимися с ними клеевому слою и люминофорной композиции. От клееного слоя тепловая энергия переходит к основанию с выводами и через выводы

и люминофорный слой отводится естественной конвекцией в окружающую среду с температурой 25 °С. В модели конвекция учитывается через коэффициент, который задаётся для каждой поверхности, расположенной в контакте с окружающей тело газовой средой. Данный коэффициент зависит как от геометрии тела, так и от условий окружающей среды. По оценкам различных коллективов исследователей для естественной конвекции в газовых средах коэффициент лежит в пределах от 1 до 30 Вт/(м²·К) [102-105]. Передача тепла излучением учтена в модели через коэффициент излучательной способности материалов конструкции, поверхности которой находятся в контакте с окружающей средой.

2.2.2 Разработка модели светодиодной лампы

Конструкция модели лампы (рисунок 2.4) состоит из стеклянной колбы, опорной конструкции с электрическими выводами и восемью СДМ. Для упрощения модели было решено пренебречь цоколем с источником питания и исследовать запаянную часть лампы со светоизлучающими модулями.

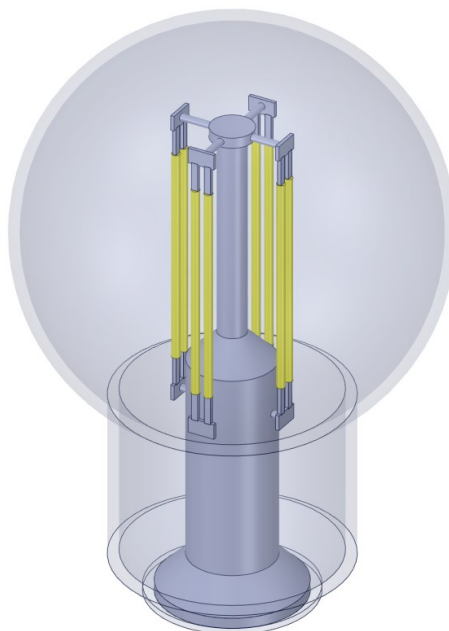


Рисунок 2.4 – Модель лампы

Коэффициенты теплопроводностей используемых материалов взяты из справочных данных [86-88] и приведены в следующей таблице.

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов материалов модели лампы

Компонент лампы	Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Колба	Стекло	0,96
Опорная конструкция		
Выводы	Платинит	60
Газовое наполнение	Воздух	0,026
	Гелий	0,155

Для исследования теплового распределения лампы построены модели с заполнением колбы воздухом и гелием. Теплопередача в лампе происходит от источников тепла – СДМ к колбе за счёт передачи тепла газовому наполнению колбы. Затем тепло отводится в окружающую среду с температурой 25 °С методом естественной конвекции. Коэффициент естественной конвекции в газовой среде был выбран исходя из литературных данных [102-105]. Передача тепла излучением учтена в модели через коэффициент излучательной способности стеклянной колбы, поверхность которой находится в контакте с окружающей средой. Разработанная модель лампы использовалась в работах [106-114] для проведения тепловых расчётов.

2.3 Результаты моделирования и анализ

2.3.1 Тепловое распределение в светоизлучающем модуле

В результате моделирования СДМ в программе Ansys рассчитаны значения максимальной и минимальной температуры при значении температуры окружающей среды 25°C [106]. Результаты отражены в таблице 2.3. Температуры рассчитаны при изменении коэффициента конвекции газовой среды, контактирующей с поверхностью люминофорной композиции и выводами СДМ.

Таблица 2.3 – Результаты моделирования коэффициента конвекции

Коэффициент конвекции, Вт/(м ² ·К)	Минимальная температура, °С	Максимальная температура, °С
1	199,63	209,50
2	184,01	193,85
3	168,20	178,02
4	154,84	164,64
5	143,21	152,98
6	133,97	143,71
7	124,61	134,32
8	116,59	126,27
9	109,62	119,26
10	103,51	113,12
12	93,34	102,88
14	85,25	94,72
16	78,70	88,09
18	73,29	82,61
20	68,78	78,02
30	54,20	63,10

Графически зависимость максимальной температуры СДМ от коэффициента конвекции представлена на рисунке 2.5. Анализ полученных результатов показывает, что снижение максимальной температуры наиболее эффективно при увеличении коэффициента конвекции от 1 до 9 Вт/(м²·К). Максимальная температура при этом снижается в среднем на 7 % на 1 Вт/(м²·К). При последующем пошаговом увеличении коэффициента конвекции с 10 до 30 Вт/(м²·К) максимальная температура снижается в среднем на 3 % на градус на 1 Вт/(м²·К).

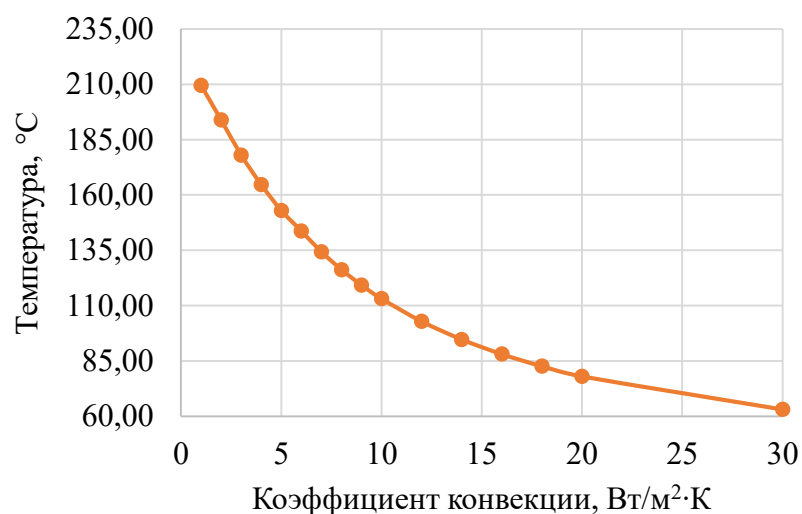


Рисунок 2.5 – График максимальной температуры от коэффициента конвекции

Тепловое распределение СДМ (рисунок 2.6) свидетельствует о неравномерном нагреве устройства. Температура выводов ниже на 5-6 °С, чем температура в центральной части, где достигается максимум.

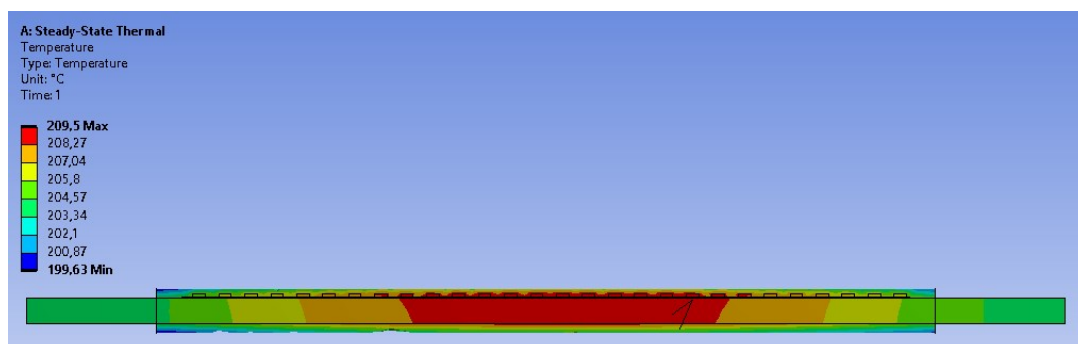


Рисунок 2.6 – Тепловое распределение СДМ

2.3.2 Тепловое распределение в светодиодной лампе

В результате моделирования конструкции светодиодной лампы в программе Ansys рассчитаны значения максимальной и минимальной температуры при значении температуры окружающей среды 25°C. Расчёты проведены для ламп с заполнением колбы воздухом и гелием. Результаты моделирования представлены в таблице 2.4. Температуры рассчитаны при изменении коэффициента конвекции воздушной среды, контактирующей с внешними поверхностям лампы.

Таблица 2.4 – Результаты расчёта максимальной и минимальной температуры в зависимости от коэффициента конвекции для ламп с различным газовым заполнением колбы

Коэффициент конвекции, Вт/(м ² ·К)	Лампа с воздухом		Лампа с гелием	
	Минимальная температура, °С	Максимальная температура, °С	Минимальная температура, °С	Максимальная температура, °С
1	42,69	286,97	53,26	127,60
2	39,70	276,10	49,55	122,98
3	37,43	267,06	46,61	119,26
4	35,66	259,41	44,22	116,19
5	34,26	252,84	42,26	113,63
6	33,12	247,13	40,63	111,46
7	32,20	242,13	39,25	109,61
8	31,43	237,69	38,07	108,00
9	30,78	233,74	37,06	106,59
10	30,23	230,18	36,18	105,35
12	29,35	224,04	34,74	103,27
14	28,68	218,91	33,60	101,60
16	28,16	214,54	32,69	100,21
18	27,74	210,76	31,94	99,04

Продолжение таблицы 2.4

20	28,12	196,80	32,69	95,09
30	26,64	184,69	29,83	90,83

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование гелия вместо воздуха, в качестве заполняющего колбу лампы газа, даёт снижение температуры в среднем на 131 °С при изменении коэффициента конвекции от 1 до 20 Вт/(м²·К) (рисунок 2.7). Также при увеличении коэффициента конвекции от 1 до 10 Вт/(м²·К) разница значений температуры составляет в среднем 2 % на 1 Вт/(м²·К) для модели лампы с гелиевым заполнением и 2,5 % на 1 Вт/(м²·К) для модели лампы с воздушным заполнением. При увеличении коэффициента конвекции от 10 до 20 Вт/(м²·К) разница значений температуры составляет в среднем 1,4 % и 2 % соответственно.

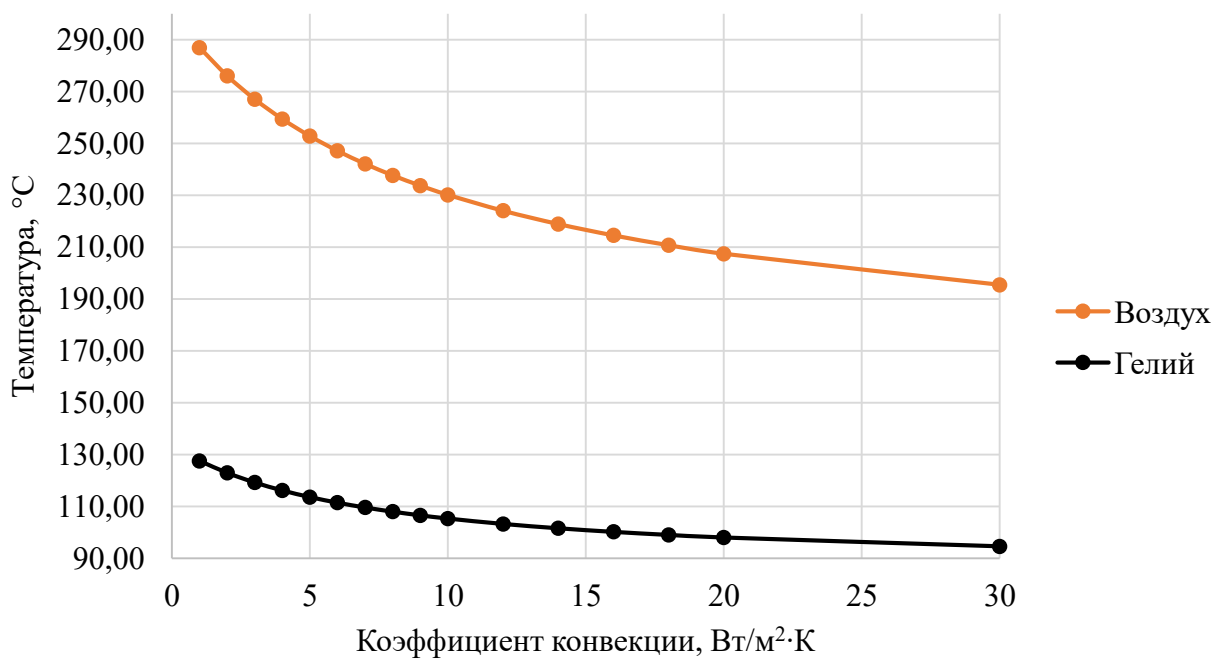


Рисунок 2.7 – График зависимости максимальной температуры от коэффициента конвекции

На рисунке 2.8 представлено тепловое распределение для модели лампы, заполненную гелием, с коэффициентом конвекции 1 Вт/(м²·К).

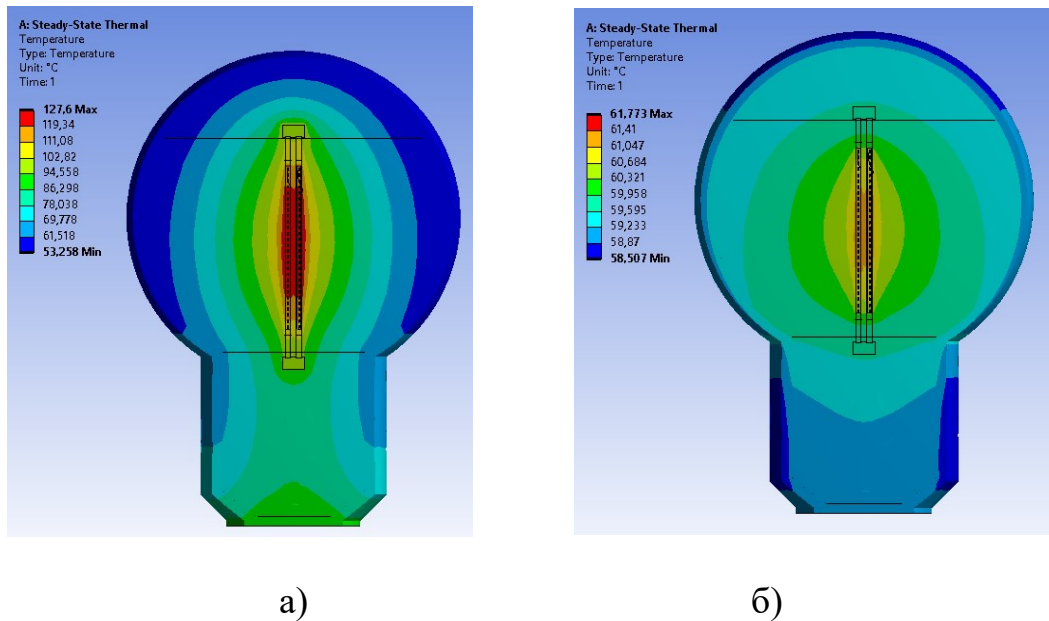


Рисунок 2.8 – Тепловое распределение модели лампы с гелием (а) и лампы с моделью газа, теплопроводностью 5 Вт/(м·К) (б)

Исследована зависимость температуры GaN/InGaN кристаллов от теплопроводности заполняющего колбу лампы газа (рисунок 2.9). Увеличение теплопроводности заполняющего газа от 0,15 до 2 Вт/(м·К) снижает максимальную температуру в среднем на 8 % на каждые 0,25 Вт/(м·К). Последующее увеличение теплопроводности от 2 до 5 Вт/(м·К) снижает температуру в среднем на 2 %, а увеличение теплопроводности от 5 до 10 Вт/(м·К) – на 0,4 %. Полученное тепловое распределение лампы показало выравнивание температуры всей модели, в том числе и температуры СДМ (рисунок 2.8, б) при увеличении теплопроводности заполняющего газа.

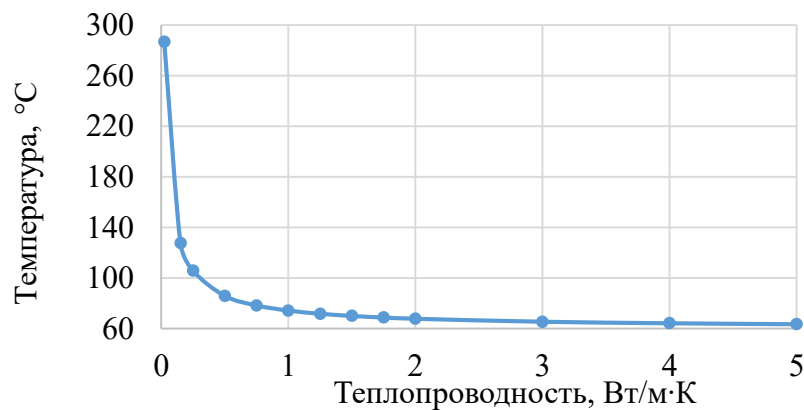


Рисунок 2.9 – Зависимость температуры GaN/InGaN кристаллов от теплопроводности заполняющего колбу лампы газа

2.4 Оценка адекватности модели

Для проведения экспериментального исследования зависимости температуры СДМ от прямого напряжения и тока изготовлено 5 макетных образцов. Экспериментальная установка состоит из СДМ, расположенного на элементе Пельтье. К СДМ прикреплена термопара. Для питания и измерения напряжения СДМ был использован источник-измеритель Keithley 2410.

В ходе эксперимента было проведено по три серии измерений напряжения на СДМ для температур 0, 25, 85 °С при токе от 1 до 14 мА. Нагревание и охлаждение СДМ элементом Пельтье осуществлено при отсутствии тока через СДМ. Для исключения влияния саморазогрева GaN/InGaN кристаллов измерение значений напряжения осуществлялось короткой подачей питания СДМ.

Выходной параметр (прямое напряжение) формируют два фактора – сила тока и температура. Значимость влияния выбранных факторов на результирующий показатель в математической статистике подтверждается методом дисперсионного анализа. Следовательно, выбран и выполнен двухфакторный дисперсионный анализ. В результате расчёта по формулам из [115], получены оценки дисперсий для двух выбранных ранее факторов, силы тока S_I^2 и для температуры S_T^2 , и оценку дисперсии совокупности случайных факторов ($S_{сл}^2$), которые могли повлиять на процесс. Затем для проверки применяют односторонний критерий Фишера (2.1). Если влияние факторов значимо, то выполняются следующие неравенства:

$$\frac{S_I^2}{S_{сл}^2} > F_{q1}; \quad \frac{S_T^2}{S_{сл}^2} > F_{q2}, \quad (2.1)$$

где, F_{q1} , F_{q2} – табличные значения, рассчитываемые по известным параметрам проведения эксперимента.

В результате анализа были получены неравенства, подтверждающие значимость факторов:

$$\frac{33,43}{0,014} > 3,37; \quad \frac{25,92}{0,014} > 2,15 \quad (2.2)$$

Следующий шаг к построению математической модели исследуемой зависимости – выполнение регрессионного анализа. Цель регрессионного анализа – определить коэффициенты в уравнении (параметры), описывающем какой-либо процесс. Для этого строится линейное уравнение (2), содержащее свободный член и сумму произведений факторов с неизвестными коэффициентами.

$$F(x; \beta) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon, \quad (2.3)$$

где, β – параметры модели;

x – факторы, влияющие на процесс;

ε – случайная погрешность уравнения.

В нашем случае регрессионное уравнение будет иметь вид:

$$U = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 T + \varepsilon \quad (2.4)$$

Решим полученное уравнение методом Крамера. Для этого составим систему нормальных уравнений, состоящую из трёх уравнений с тремя неизвестными [116]:

$$\begin{cases} \sum U_i = n \cdot \beta_0 + \beta_1 \sum I_i + \beta_2 \sum T_i; \\ \sum I_i U_i = \beta_0 \sum I_i + \beta_1 \sum I_i^2 + \beta_2 \sum I_i T_i; \\ \sum T_i U_i = \beta_0 \sum T_i + \beta_1 \sum I_i T_i + \beta_2 \sum T_i^2, \end{cases} \quad (2.5)$$

где $n = 42$ – число наблюдений.

Полученная система имеет следующее решение:

$$\beta_0 = 74,617 \text{ В}; \beta_1 = 0,259 \frac{\text{В}}{\text{мА}}; \beta_2 = -0,0354 \frac{\text{В}}{^\circ\text{С}}. \quad (2.6)$$

Подставим рассчитанные коэффициенты в уравнение (2.4) и получим уравнение регрессии, описывающее зависимость напряжения СДМ от тока и температуры. Перед выполнением анализ качества уравнения регрессии, необходимо определим ошибки аппроксимации и оценку дисперсии. Абсолютная ошибка аппроксимации ε_i определена как разница между значениями измеренного напряжения и значениями, рассчитанными по полученному уравнению регрессии. Оценка дисперсии S_e^2 рассчитана как $\sum \varepsilon_i^2 = 6,242$. Несмещённая оценка дисперсии

определена по формуле (2.7) и равна 0,16. Рассчитанное значение средней ошибки аппроксимации составило 0,42 %.

$$S^2 = \frac{1}{n-m-1} \cdot S_e^2, \quad (2.7)$$

где $m = 2$ – число факторов.

Качество уравнения регрессии можно оценить по коэффициенту детерминации R^2 . Рассчитаем его по следующей формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{S_e^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}, \quad (2.8)$$

где $\sum(y_i - \bar{y})^2 = \sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum(y_i - \hat{y}_i)^2$ – общая сумма квадратов отклонений;

\hat{y}_i – расчётное значение функции.

Получено значение $R^2 = 0,948$. При значении R^2 близком к 1, уравнение регрессии точнее описывает фактические данные и факторы сильнее влияют на результат.

Проверка статистической значимости коэффициента детерминации проведена с помощью F-статистики распределения Фишера. Для этого рассчитано значение F-критерия по формуле:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m} \quad (2.9)$$

Табличное значение при степенях свободы $k_1 = m = 2$ и $k_2 = n-m-1 = 39$ составило $F_{кр} = 3,23$; $\alpha = 0,05$. Поскольку фактическое значение $F = 352,3$ больше $F_{кр}$, то коэффициент детерминации считается статистически значимым, а уравнение регрессии статистически надёжным.

2.5 Выводы по результатам моделирования

В программе конечно-элементного анализа Ansys смоделированы конструкции СДМ и ламп с заполнением колбы ламп воздухом и гелием. Рассчитаны значения максимальной и минимальной температуры моделей, построены температурные зависимости от коэффициента конвекции при температуре окружающей среды равной 25 °С. Также показано тепловое распределение СДМ и лампы, которые демонстрируют неравномерный нагрев СДМ. Перегрев в центральной части линейки может привести к выходу их из строя всего устройства, так как кристаллы электрически соединены последовательно.

По полученным данным можем сделать вывод, что увеличение теплопроводности газа, заполняющего колбу лампы, способствует выравниванию температурного профиля как самой лампы, так и СДМ. Таким образом, создание новых технических решений с улучшенными тепловыми характеристиками возможно двумя способами:

- 1) увеличением равномерности теплового распределения СДМ;
- 2) увеличением теплопроводности внутри колбы лампы.

Проведено экспериментальное исследование зависимости температуры GaN/InGaN кристаллов от прямого напряжения и тока. В результате исследования получена математическая модель с помощью регрессионного анализа. Значимость влияния выбранных факторов на результирующий показатель подтверждена методом двухфакторного дисперсионного анализа по критерию Фишера. Качество уравнения регрессии оценено по коэффициенту детерминации R^2 . Проверка статистической значимости коэффициента детерминации проведена с помощью F-статистики распределения Фишера, результаты которой подтвердили статистическую надёжность уравнения регрессии.

3 Результаты исследований новых технических решений

3.1 Светодиодная лампа со светодиодным модулем с распределёнными кристаллами

3.1.1 Описание конструкции

Конструкция светодиодной лампы аналогична конструкции лампы из подраздела 2.2 пункт 2.2.2 диссертации за исключением конструкции СДМ. Для увеличения равномерности теплового распределения СДМ предложено техническое решение, которое отличается расположением кристаллов на основании.

Конструкция СДМ (рисунок 3.1) представляет собой протяжённую подложку (1), на которой размещены излучающие кристаллы, покрытые люминофорной композицией (2), контактные выводы (3) для присоединения к токовводам лампы и диэлектрическая вставка (4). Предложенное техническое решение отличается от известной конструкции тем, что кристаллы расположены на подложке на переменном расстоянии друг от друга, значение которого изменяется вдоль продольной оси подложки от наибольшего значения $1,5 \cdot L / (N - 1)$ между центрами кристаллов в середине подложки до значения $0,5 \cdot L / (N - 1)$ на ее концах, где L – длина подложки (без учёта длины выводов и диэлектрической вставки), N – количество излучающих кристаллов ($N = 3, 4, \dots$).

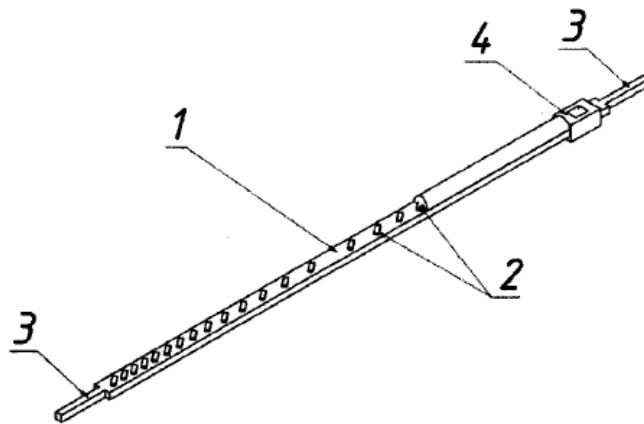


Рисунок 3.1 – Схематичное изображение конструкции СДМ

3.1.2 Разработка моделей и тепловые расчёты светодиодного модуля с распределёнными кристаллами и лампы

Отличительной особенностью предложенного варианта конструкции светодиодной лампы является замена СДМ с кристаллами, равноудаленно расположенными друг от друга, на СДМ с кристаллами, разнесёнными по поверхности подложки от её центра. Кристаллы расположены на подложке на переменном расстоянии друг от друга (рисунок 3.2), значение которого изменяется вдоль продольной оси подложки от наибольшего значения между кристаллами в середине подложки до минимального значения на ее концах. Так как центрами тепловыделения в конструкции СДМ являются полупроводниковые кристаллы, большие расстояния между ними в середине создают условия для более эффективного отведения тепла именно в центре, где при равноудалённом расположении наблюдается локальный перегрев. Более эффективное отведение тепла в центре подложки позволяет повысить равномерность распределения температуры по длине подложки и уменьшить ее значение.

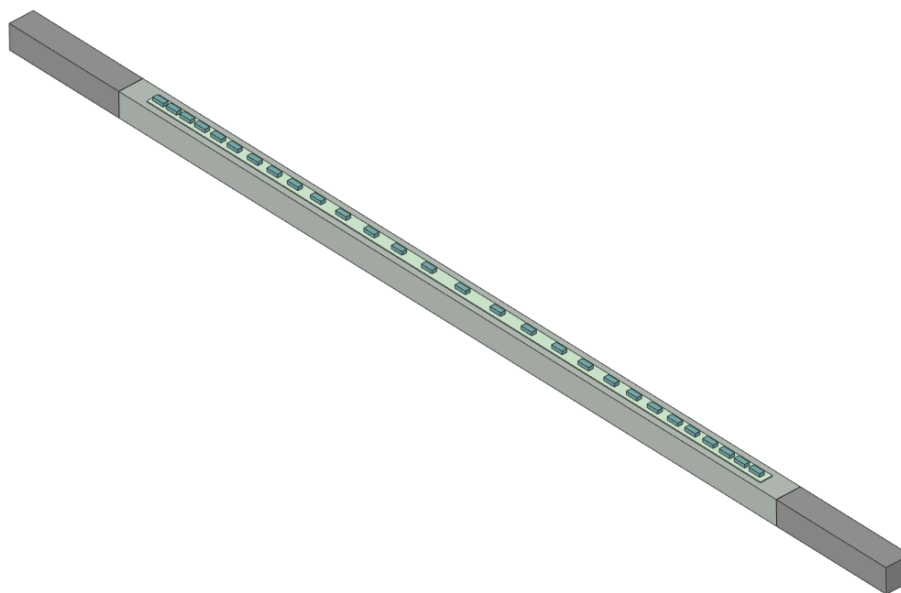


Рисунок 3.2 – Модель СДМ с распределёнными кристаллами

Моделирование теплового распределения (рисунок 3.3) наглядно продемонстрировало выравнивание температурного профиля. Максимальная

температура устройства снизилась на 3 °С, что подтверждает исследования, описанные в работе [19].

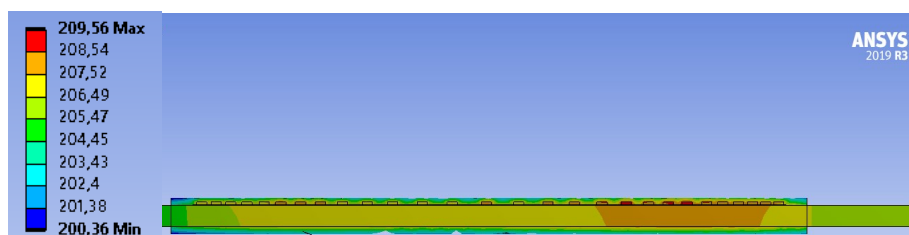


Рисунок 3.3 – Тепловое распределение СДМ с распределёнными кристаллами

Смоделирована светодиодная лампа с предложенными СДМ и проведён тепловой расчёт (рисунок 3.4). Модель лампы заполнена гелием, параметры используемых материалов аналогичны модели лампы, представленной в пункте 2.2.2 диссертации. По сравнению с аналогичной моделью, предложенное техническое решение позволило снизить температуру светодиодной лампы на 3,7 °С или на 3 %.

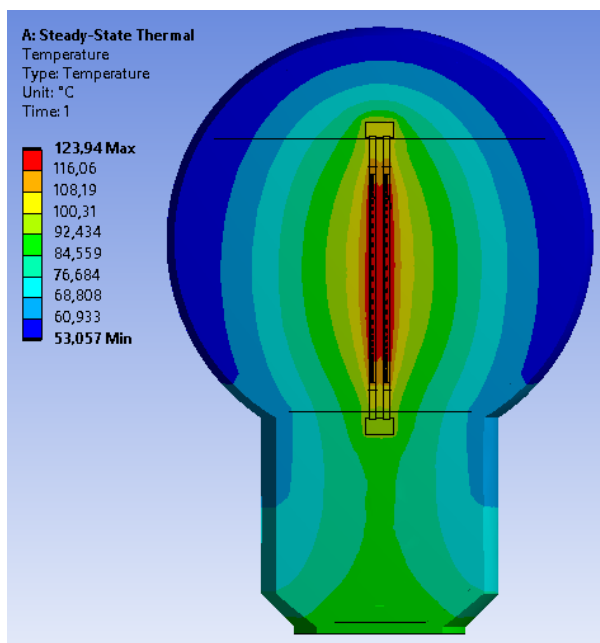


Рисунок 3.4 – Тепловое распределение светодиодной лампы с СДМ с распределёнными кристаллами

Предложенный способ расположения кристаллов вдоль подложки может быть применен и в светодиодной ленте для лампы. Техническое решение обладает новизной и защищено патентом на полезную модель (Приложение А).

3.2 Светодиодная лампа с линзой

3.2.1 Описание конструкции

Светодиодная лампа (рисунок 3.6) содержит колбу (1), заполненную газом (2), в которой размещен держатель со штенгелем (4) и стойкой сердечника (3), на которой закреплена объемная излучающая свет конструкция из светодиодных модулей (5), цоколь (6) и устройство питания (7). Устройство питания установлено в цоколе и электрически соединено с ним и светодиодными модулями. Вершина колбы заполнена оптически прозрачным резиноподобным теплопроводящим материалом (8), в который погружены светодиодные модули с объемной конструкцией на глубину, равную видимой металлизированной части СДМ.

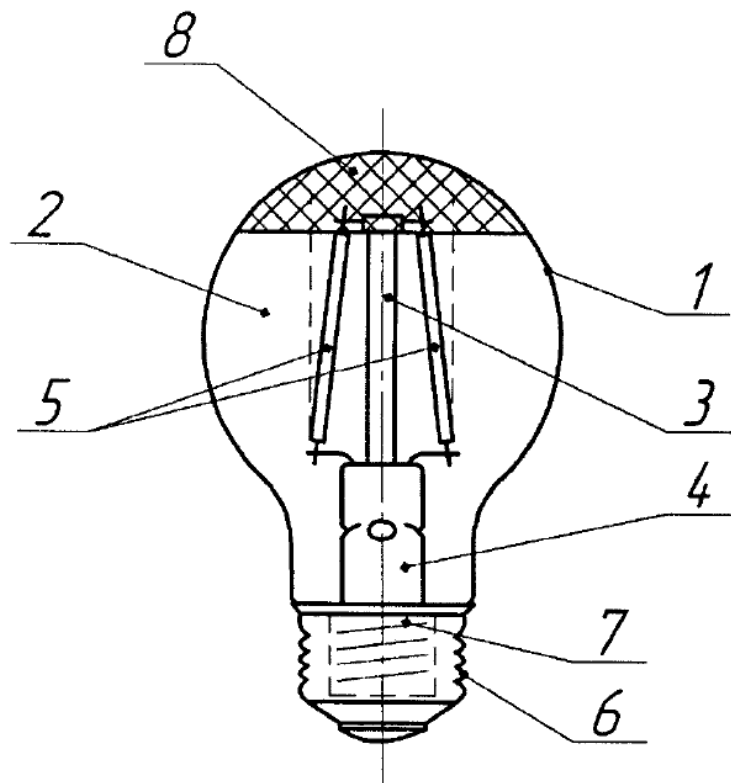


Рисунок 3.6 – Схематичное изображение конструкции светодиодной лампы с линзой

За счет погружения светодиодных модулей с объемной конструкцией в оптически прозрачный резиноподобный теплопроводящий материал на глубину их металлизированной части повышается эффективность отвода тепла от СДМ. Кроме

того, «резиноподобный материал» выполняет функцию формирования более равномерного светового распределения в меридиональной плоскости. Предлагаемая конструкция лампы имеет форму традиционной лампы накаливания и доступна для массового производства практически без изменения технологического заводского процесса.

3.2.2 Разработка модели светодиодной лампы и тепловой расчёт

Построена модель светодиодной лампы (рисунок 3.7) отличающаяся добавлением в вершину колбы оптически прозрачного теплопроводящего материала.

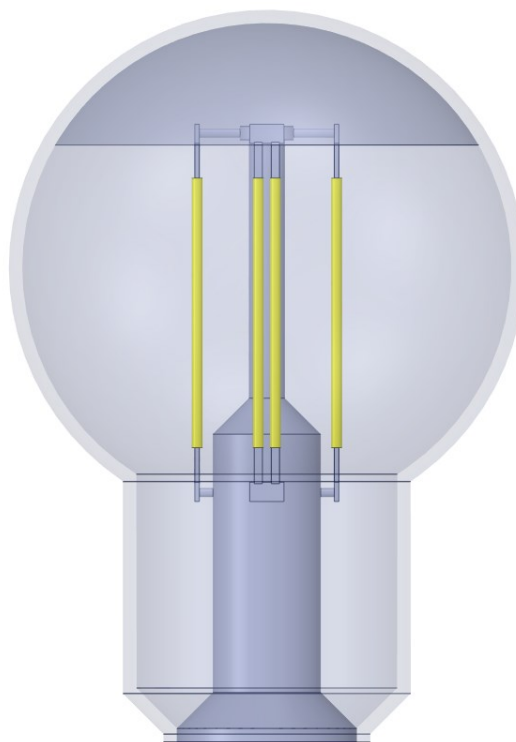


Рисунок 3.7 – Модель светодиодной лампы с линзой

По разработанной модели светодиодной лампы проведён расчёт минимальной и максимальной температуры при заполнении колбы лампы воздухом и гелием (таблица 3.1). Значение коэффициента теплопроводности линзы изменялось от значений газовой среды внутри лампы, $0,026 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ для воздуха и

0,155 Вт/(м·К) для гелия, до 20 Вт/(м·К). Результаты расчётов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты теплового расчёта максимальной и минимальной температуры ламп в зависимости от коэффициента теплопроводности материала линзы

Коэффициент теплопроводности линзы, Вт/(м·К)	Модель лампы с воздухом		Модель лампы с гелием	
	Минимальная температура, °С	Максимальная температура, °С	Минимальная температура, °С	Максимальная температура, °С
0,024	42,49	286,97	53,26	135,72
0,15	44,53	237,91	53,18	127,60
0,50	44,27	202,29	53,13	120,69
1,00	44,00	187,50	53,94	117,23
1,50	43,88	181,19	53,08	115,55
2,00	43,80	177,59	53,07	114,54
2,50	43,76	175,24	53,07	113,86
3,00	43,74	173,57	53,07	113,36
3,50	43,73	172,31	53,74	112,98
4,00	43,72	171,32	53,08	112,68
4,50	43,72	170,53	53,08	112,43
5,00	43,71	169,87	53,10	112,22
7,50	43,69	167,72	53,11	111,55
10,00	43,69	166,52	53,12	111,17
15,00	43,69	165,17	53,13	110,73
20,00	43,70	164,39	53,13	110,49

Полученные результаты (рисунок 3.8) свидетельствуют о том, что наибольшее снижение максимальной температуры, равное в среднем 9 % на

1 Вт/(м·К) для воздушного заполнения колбы лампы и 3 % на 1 Вт/(м·К) для гелиевого заполнения, дают материалы с теплопроводностью до 2 Вт/(м·К). Дальнейшее повышение теплопроводности с шагом в 1 Вт/(м·К) даёт снижение температуры в среднем на 0,7 % для лампы с воздушным заполнением колбы и 0,3 % для лампы с гелиевым заполнением.

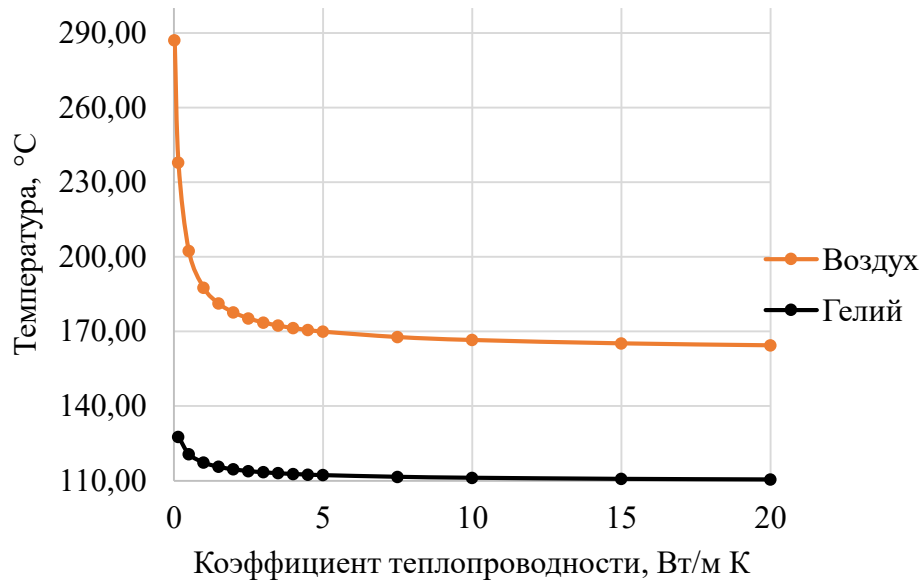


Рисунок 3.8 – Зависимость максимальной температуры от коэффициента теплопроводности линзы

На рисунке 3.9 представлено тепловое распределение для лампы с линзой из материала с теплопроводностью 2 Вт/(м·К). В отличие от теплового распределения для лампы заполненной гелием линза увеличивает теплоотвод от СДМ, что отчётливо видно на рисунке.

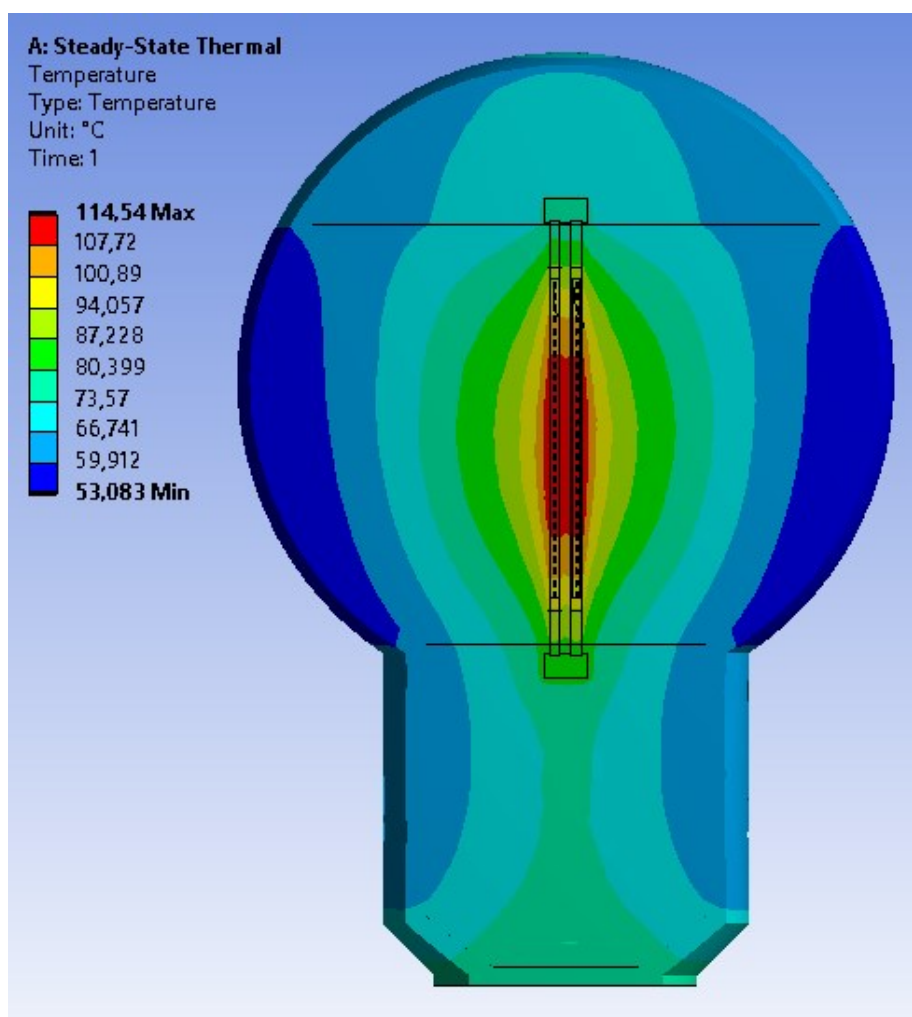


Рисунок 3.9 – Тепловое распределение лампы с линзой

3.2.3 Исследование характеристик макетных образцов ламп

Для проведения экспериментального исследования было изготовлено два макета ламп, заполненные воздухом (№ 1, 2), два макета ламп, заполненные воздухом (№ 3, 4) и два макета ламп с гелием (№ 5, 6).

Во всех макетных образцах используются покупные ИП представляющие собой стабилизатор тока, рассчитанный для питания СДМ по 10 мА для каждого. Соединение СДМ выполнено по последовательно-параллельной схеме.

Для макетных образцов № 3, 4 в качестве материала линзы использовался компаунд Dow Corning Sylgard 184 с теплопроводностью 0,15 Вт/(м·К), в качестве заполняющего колбу лампы газа – воздух.

Перечень средств измерений приведён в приложении Б.

Измерения проведены в нормальных климатических условиях:

температура окружающего воздуха, °С	20 ± 10 ;
относительная влажность воздуха, %	от 45 до 80;
атмосферное давление, мм рт. ст.	от 630 до 800.

Проведено измерение значения светового потока (Φ) для ламп, заполненных воздухом и гелием. Измерения осуществлялись в соответствии с ГОСТ Р 55702 фотометрическим шаром с использованием в качестве источника питания лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) и измерителя мощности ваттметра.

Методика проведения измерений:

- 1) Установить макетный образец лампы в фотометрический шар.
- 2) Подключить макетный образец лампы в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 3.10.

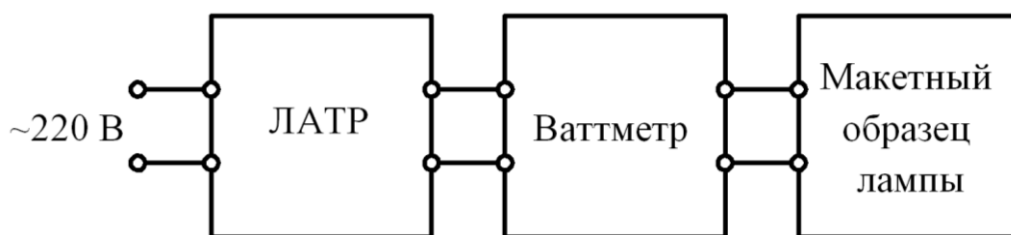


Рисунок 3.10 – Схема подключения объекта исследования

- 3) Включить питание фотометрического шара (рисунок 3.11).
- 4) Установить на выходе ЛАТР значение напряжения (220 ± 2) В, контролируя значение напряжения по показаниям ваттметра.
- 5) Выдержать макетный образец лампы во включенном состоянии не менее 5 минут для термостабилизации.
- 6) Записать значение светового потока.

Результаты измерений светового потока сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты измерений

Макет лампы	Световой поток (Φ), лм	Мощность (P), Вт	Световая отдача (n), лм/Вт
№ 1	914 ± 10%	7,62 ± 0,2%	119,9 ± 10,2%
№ 2	908 ± 10%	7,59 ± 0,2%	119,6 ± 10,2%
№ 3	938 ± 10%	7,68 ± 0,2%	122,1 ± 10,2%
№ 4	934 ± 10%	7,65 ± 0,2%	122,1 ± 10,2%
№5	1070 ± 10%	7,71 ± 0,2%	138,8 ± 10,2%
№6	1065 ± 10%	7,79 ± 0,2%	136,7 ± 10,2%



Рисунок 3.11 – Оборудование для измерения светового потока ламп

Проведён расчёт значения световой отдачи (n) с использованием измеренных значений потребляемой мощности и измеренных значений светового потока для каждого макетного образца лампы по формуле:

$$n = \Phi/P, \quad (3.1)$$

где n – значение световой отдачи, лм/Вт;

Φ – значение светового потока, лм;

P – значение потребляемой мощности, Вт.

Результаты расчёта приведены в таблице 3.2.

Проведено измерение кривой силы света (КСС) в соответствии с ГОСТ Р 55702 на гониофотометре. Методика проведения измерений:

- 1) Установить макетный образец лампы в зажим гониофотометра.
- 2) Выставить оптическую ось между макетом лампы и фотодатчиком.
- 3) Выставить центр вращения макетного образца лампы соосно с центром вращения гониометрического блока установки.
- 4) Включить ПК, запустить программу «Гониофотометр».
- 5) Подключить макетный образец лампы в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.2.
- 6) Установить на выходе ЛАТР значение напряжения (220 ± 2) В, контролируя значение напряжения по показаниям ваттметра.
- 7) Выдержать макетный образец лампы во включенном состоянии не менее 5 минут для термостабилизации.
- 8) Нажать в программе кнопку «Пуск» и повернуть на 120 градусов платформу гониометра сначала в одну сторону, затем на 120 градусов в другую относительно центрального положения платформы.
- 9) Нажать кнопку «Стоп».
- 10) Сохранить графики зависимости силы света от угла излучения в меридиональной плоскости.

На рисунке 3.12 представлены КСС для ламп без линзы (1) и для лампы с линзой (2).

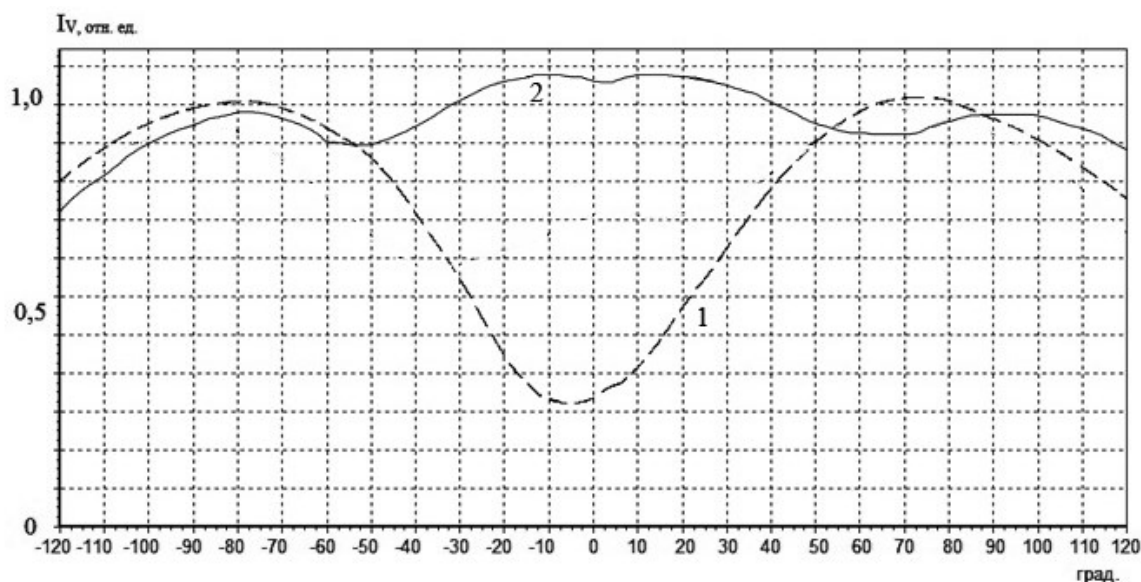


Рисунок 3.12 – Кривая силы света

В случае 1 мы видим «провал» в характеристике от минус 70 до 60 градусов. Минимальная точка этого «провала» соответствует положению лампы во время измерения вершиной колбы к фотоприёмнику измерительной установки [76, 123]. Такое поведение светового распределения вполне закономерно, так как расположение СДМ в лампе практически вертикальное (как у модели на рисунке 2.5). Во втором случае мы видим выравнивание характеристики в данном угловом диапазоне. Это связано с собирающими свет свойствами сформированной линзы в вершине колбы лампы.

Результаты измерений, приведённые в таблице 3.2, показывают увеличение светового потока при увеличении теплоотвода от СДМ за счёт увеличения теплопроводности заполняющего газа и добавления в конструкцию лампы линзы из теплопроводящего материала. Известно, что световые параметры полупроводниковых источников света зависят от их рабочей температуры [15, 32, 38, 74, 117, 118]. В этом случае данное увеличение светового потока косвенно подтверждает снижение температуры СДМ. Полученные результаты измерений [119-126] хорошо согласуются с известными зависимостями и результатами моделирования.

Техническое решение обладает новизной и защищено патентами на полезные модели (Приложение А).

3.3 Светодиодная лампа с источником свободных электронов

3.3.1 Описание конструкции

Конструкция светодиодной лампы (рисунок 3.13) состоит из стеклянной колбы (1), внутренняя поверхность которой покрыта оптически прозрачным слоем высоко проводящего материала (4). Из внутреннего объёма стеклянной колбы откачивается воздух до уровня форвакуума. Внутри колбы расположен штенгель (7) со стойкой сердечника (2), к которому крепится конструкция в виде внешней поверхности усеченного конуса (5), изготовленного из высоко проводящего металла с покрытием его внешней поверхности монослоем вещества с малой работой выхода. СДМ (3) закреплены на внешнюю сторону металлической конструкции и соединены с выводами сердечника и штенгеля. К металлическому конусу с закрепленными на нем СДМ присоединяется отрицательный полюс (6) источника напряжения от устройства питания (8), а положительный полюс к проводящему слою на внутренней поверхности стеклянной колбы.

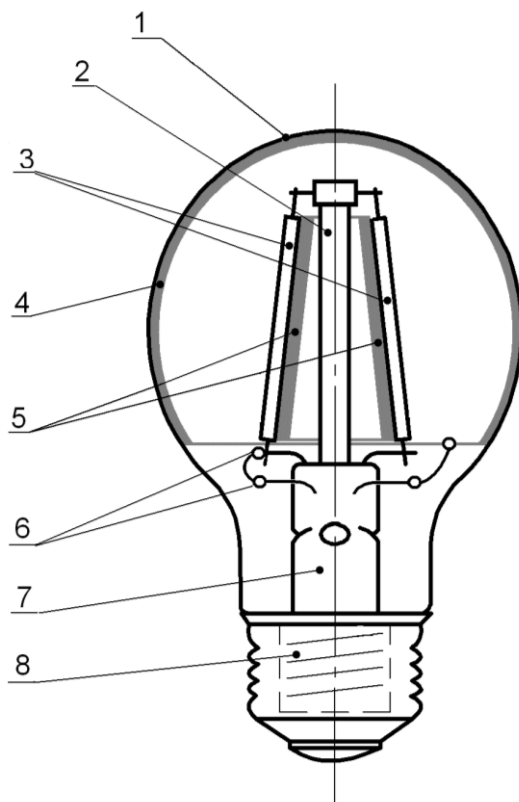


Рисунок 3.13 – Схематическое изображение конструкции светодиодной лампы с охлаждением электронным потоком

В данном техническом решении охлаждение нагреваемых в процессе работы СДМ осуществляется за счет переноса тепла потоком электронов от нагретого до температуры СДМ конусообразного основания к стеклянной колбе. Ввиду малой массы электронов в сравнении с массой молекул гелия длина их свободного пробега практически равна радиусу колбы, что является физической причиной повышения эффективности охлаждения СДМ. Достижимое таким способом снижение рабочей температуры по сравнению с источниками с гелиевым охлаждением позволяет увеличить надёжность и срок службы лампы.

3.3.2 Принцип работы и оценка эффективности охлаждения потоком электронов

Принципиальным недостатком охлаждения СДМ газовой средой внутри колбы лампы является то, что молекулы охлаждающего газа обладают массой (за счет того, что их в ядрах имеются по несколько протонов и нейтронов), тысячи и десятки тысяч раз большей массы электрона. Известно, что в равновесном состоянии газа со свободными электронами количество тепловой энергии, запасенной в ионном и электронном газах, одинаково, а их подвижности отличаются на несколько порядков. Значит электроны будут переносить тепло более эффективно, чем ионы. Поскольку различие в массах свободного электрона и молекулы гелия составляет более десяти тысяч, то электронное охлаждение потенциально эффективнее ионного. Из этого следует центральная идея предлагаемого технического решения: использовать для охлаждения в качестве переносчиков тепла вместо ионов поток свободных электронов.

Поставленная задача решается тем, что внутри стеклянной колбы, содержащей стойку сердечника с закрепленными на ней несколькими СДМ из светодиодных гетероструктур на основе барьеров InGaN/GaN, взамен гелиевого наполнения размещают источник свободных электронов с ненакаливаемым катодом, температурно-сопряженным с СДМ и подключенным к отрицательному полюсу источника постоянного напряжения (устройство питания лампы), а

положительный полюс источника присоединяется к электропроводящему слою из оптически прозрачного материала, нанесенному на внутреннюю поверхность стеклянной колбы. Эмитируемые с катода свободные электроны, имея температуру светодиодных кристаллов (около 400 К), под действием электрического поля, создаваемого напряжением от устройства питания, движутся к стенкам стеклянной колбы, температура которой ниже указанной температуры кристаллов. В результате соударения электронов с анодом они отдают избыток своей энергии аноду, т.е. колбе, которая, в свою очередь, охлаждается воздухом из окружающей среды. После этого потерявшие избыток энергии электроны попадают на положительный полюс источника напряжения «анод – катод» V . Вновь эмитируемые с катода электроны, унося энергию, равную работе выхода вещества катода, повторяют путь первых электронов. Поскольку вольт-амперная характеристика промежутка «поверхность колбы – катод из СДМ» аналогична характеристике вакуумного диода, то выбором величины напряжения V добиваются максимальной величины электронного тока, что соответствует максимальной эффективности данной системы охлаждения.

Для улучшения эмиссионных свойств катода он изготавливается в виде пленки толщиной порядка нескольких мкм, нанесенной на внешние грани конструкции с СДМ, из широкозонного полупроводникового материала, например, GaAs с концентрацией электронов в зоне проводимости до 10^{18} см⁻³. Дополнительное число свободных электронов в катоде создается за счет генерации свободных электронов в нем при поглощении им фотонов из спектра генерируемого излучения, отраженных от элементов лампы и попавших на поверхность катода. В случае генерации источником белого цвета его спектр излучения практически полностью совпадает со спектром поглощения GaAs, что гарантирует высокую «утилизацию» катодом фотонов, не вышедших из лампы в окружающее пространство.

Анод источника свободных электронов изготавливается в виде оптически прозрачной пленки из высоко проводящего материала, например, ИТО или сильно

легированного полупроводника с малой шириной запрещенной зоны (для исключения поглощения сгенерированных источником излучения фотонов во всем спектре излучения). Её толщина составляет 200-400 Ангстрем. Поток горячих электронов эмитируется с катода, который представляет собой пустотелый усеченный конус из тугоплавкого металла, на который наносится слой легированного широкозонного полупроводника с моноатомным покрытием эмитирующей поверхности слоем вещества с малой работой выхода. Светоизлучающие кристаллы, собранные в филаменты, равномерно приклеиваются к внешней поверхности катода теплопроводящим клеем. К собранному таким способом катоду прикладывается отрицательный полюс источника однополярного напряжения величиной 220 В от высоковольтного драйвера № 2, находящегося в цоколе лампы вместе с драйвером № 1 для создания постоянного тока через СДМ лампы. Положительный полюс от драйвера № 2 припаивается к аноду, представляющему собой слой электропроводящего оптически прозрачного вещества, нанесенный на внутреннюю поверхность стеклянной колбы.

Для замены ионов молекулярного гелия электронами необходимо определить, во-первых, различие в величинах их импульсов при тепловом движении $m_e v_e$ и $M_i v_i$, а во-вторых, зависимость величины коэффициента теплопроводности электронного газа K_e в сравнении с аналогичным параметром для молекул гелия K_i . Коэффициент температуропроводности зависит от плотности вещества ρ , удельной теплоемкости C_V и скорости движения следующим образом [132]:

$$K_e = C_V^{(e)} \rho_e v_e; \quad (3.2)$$

$$K_i = C_V^{(i)} \rho_i v_i. \quad (3.3)$$

Для получения выигрыша в эффективности охлаждения электронным газом их отношение должно быть больше единицы:

$$\frac{K_e}{K_i} = \frac{C_V^{(e)}}{C_V^{(i)}} \cdot \frac{n_e}{N_i} \cdot \frac{m_e v_e}{M_i v_i} \geq 1 \quad (3.4)$$

Из равенства тепловой энергии, запасенной электронной и ионной подсистемами, найдем

$$\frac{m_e v_e}{M_i v_i} = \frac{m_e}{2000 \cdot 16 \cdot m_e} \cdot \sqrt{\frac{M_i}{m_e}} = \frac{1}{\sqrt{3.2 \cdot 10^4}} \cong \frac{10}{1.7} \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-3} \quad (3.5)$$

Тогда, учитывая, что соотношение теплоемкостей электронного и ионного газов по литературным данным равно 5.7, выражение (3.3) даст условие получения эффективного охлаждения электронным газом по сравнению с охлаждением молекулярным гелием в виде:

$$\frac{K_e}{K_i} = 5.7 \cdot \frac{n_e}{N_i} \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 3.4 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{n_e}{N_i} > 1 \quad (3.6)$$

Отсюда найдем требуемую концентрацию электронов в колбе источника излучения:

$$n_e > 30 N_i \quad (3.7)$$

На практике это соотношение можно заменить равенством: $n_e > 10^2 N_i$, что должно обеспечить трехкратное увеличение эффективности охлаждения.

Исходя из модели одномолекулярного газа, найдем требуемую концентрацию ионов, а из неё и электронов. Согласно указанной модели концентрация ионов внутри лампы, обеспечивающих давление $P = 0.1$ атм, может быть найдено с помощью известного выражения:

$$p = nkT, \quad (3.8)$$

где p – давление газа, Па;

n – концентрация молекул газа, $1/\text{м}^3$;

k – постоянная Больцмана, Дж/К;

T – температура, К.

Отсюда найдем: $N_i \cong 2 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$. Следовательно, требуемая концентрация электронов для получения трехкратного увеличения эффективности охлаждения составляет $n_e \cong 2 \cdot 10^{22} \text{см}^{-3}$.

Следующий важный параметр, характеризующий подвижность электронов и ионов, это их длина свободного пробега – λ_e и λ_i , рассчитываемые по диаметру частицы – $d_e = 2.82 \cdot 10^{-13}$ см и $d_i = 2.18 \cdot 10^{-8}$ см:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot N} \quad (3.9)$$

Это выражение дает: $\lambda_e \cong 3.0$ см, $\lambda_i = 2.58 \cdot 10^{-5}$ см. Полученные значения длин свободного пробега показывают, что если ионы в процессе их диффузии от филамента до стенки стеклянной колбы диаметром около 6-7 см испытают порядка 10^5 столкновений, то электроны всего несколько столкновений. Этот вывод хорошо согласуется с общей концепцией более высоких транспортных возможностей электронов в сравнении с ионами.

Также, используя формулы из [132] можем оценить теплопроводность гелия χ_i и электронного газа χ_e по имеющимся данным:

$$\chi = \frac{1}{3} \cdot m \cdot n \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot \mu}} \cdot \lambda \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{3}{2} \cdot R \quad (3.10)$$

где m – масса молекулы газа, г;

μ – молярная масса газа, г/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К).

Получим следующие значения для гелия $\chi_i = 1.5 \cdot 10^{-3}$ и для электронного газа $\chi_e = 4.5 \cdot 10^4$

Таким образом, приведенные расчеты показывают, что использование в качестве охлаждающего агента электронов вместо ионов гелия позволяет повысить эффективность охлаждения СДМ лампы со стеклянной колбой в несколько раз.

3.3.3 Моделирование и тепловые расчёты светодиодной лампы с газовым наполнением повышенной теплопроводности

Предложенный вариант конструкции светодиодной лампы, обладает газовой средой с повышенной теплопроводностью. Поэтому в модели светодиодной лампы прототипа был заменён заполняющий колбу лампы гелий на модель газа с регулируемым коэффициентом теплопроводности. Результаты тепловых расчётов лампы с газом повышенной теплопроводности сведены в следующей таблице.

Таблица 3.3 – Результаты тепловых расчётов

Коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К)	Минимальная температура, °С	Максимальная температура, °С
0,15	53,26	127,60
0,25	54,92	105,73
0,50	56,61	85,80
0,75	57,30	78,23
1,00	57,68	74,18
1,25	57,92	71,66
1,50	58,09	69,93
1,75	58,21	68,66
2,00	58,30	67,69
3,00	58,52	65,34
4,00	58,64	64,12
5,00	58,58	63,36
10,00	58,51	61,77

Полученные результаты (рисунок 3.14) свидетельствуют о том, что увеличение теплопроводности заполняющего газа от 0,15 до 2 Вт/(м·К) снижает максимальную температуру в среднем на 8,5 % на каждые 0,25 Вт/(м·К).

Последующее увеличение теплопроводности от 2 до 5 Вт/(м·К) снижает температуру в среднем на 2,3 %, а увеличение теплопроводности от 5 до 10 Вт/(м·К) – на 0,4 %.

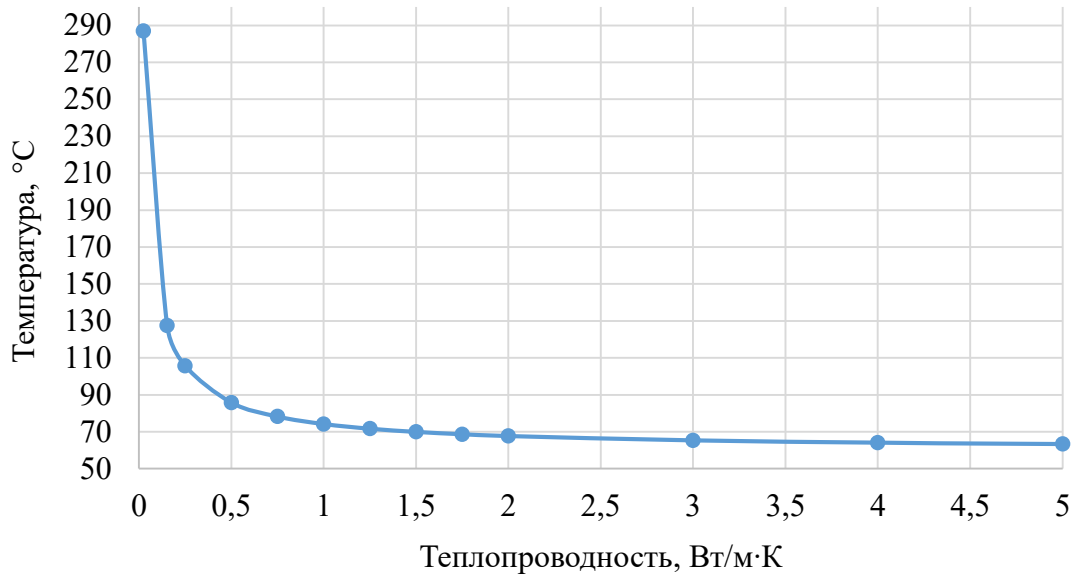
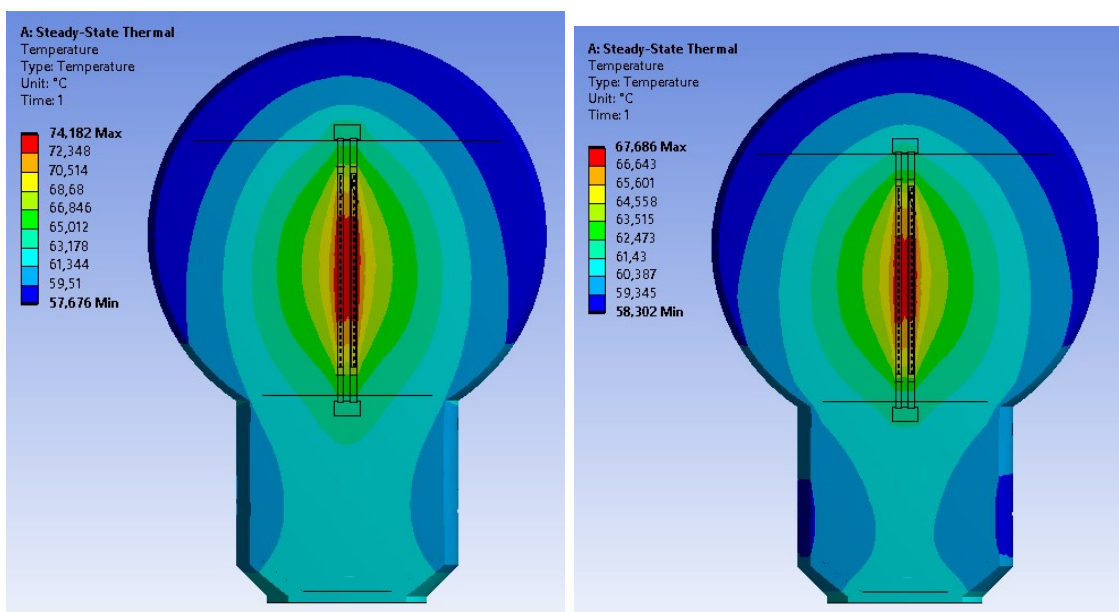


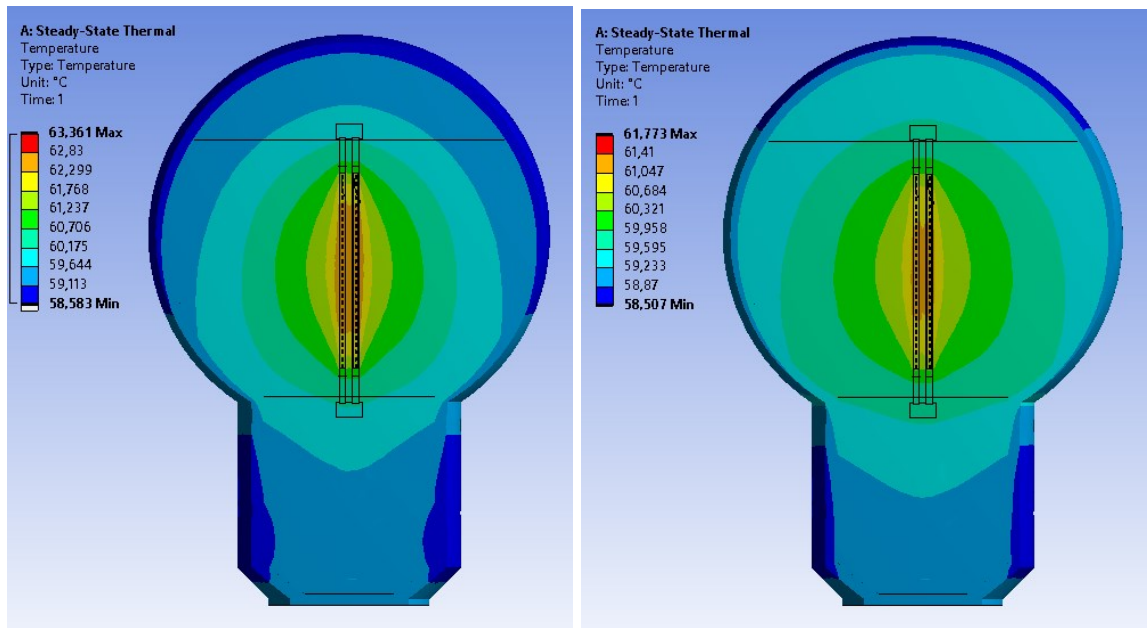
Рисунок 3.14 – Зависимость максимальной температуры модели лампы от теплопроводности заполняющего колбу газа

Полученное тепловое распределение лампы раскрывает ещё один положительный эффект – выравнивание температуры всей модели, в том числе и температуры СДМ (рисунок 3.15).



а) 1 Вт/(м·К)

б) 2 Вт/(м·К)



в) 5 Вт/(м·К)

г) 10 Вт/(м·К)

Рисунок 3.15 – Тепловое распределение моделей ламп с увеличенной теплопроводностью заполняющего газа

3.4 Температурные зависимости электрических и световых параметров макетов светодиодных модулей

По разработанной в ходе выполнения проекта [133] конструкторской документации изготовлены макеты СДМ (рисунок 3.16) и проведены экспериментальные исследования температурных зависимостей спектра излучения, яркости, вольт-амперных (ВАХ) и колориметрических характеристик. Условия проведения эксперимента и результаты подробно описаны в статье [119].

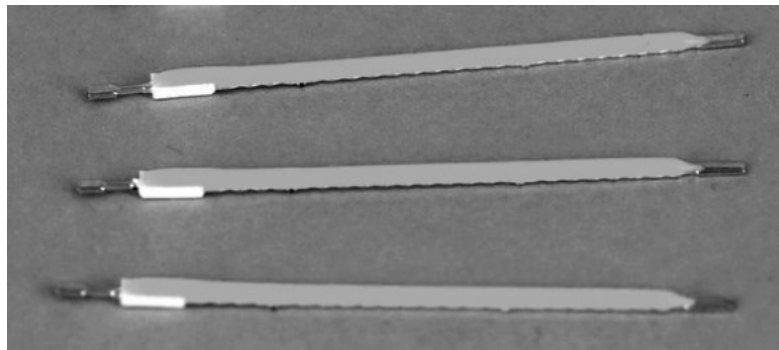


Рисунок 3.16 – Макетные образцы нитевидного светодиодного модуля

На металлическое основание с использованием теплопроводящего клея смонтированы 28 светодиодных кристаллов Epistar ES-EEDBF09F, соединенных металлической проволокой последовательно и залитых люминофорной композицией. Мощность СДМ составила 0,7 Вт. Экспериментальные исследования температурных зависимостей проводились при использовании элемента Пельтье, так как с его помощью возможно изменять температуру от 0 до 90°C с погрешностью не более $\pm 3^\circ\text{C}$ путем увеличения либо уменьшения подаваемого на элемент напряжения, и лабораторной электропечи «Snol 58/350» (нестабильность температуры $\pm 2^\circ\text{C}$) для имитации условий повышенной температуры окружающей среды. Измерения проведены в диапазоне температур от 0 до 90°C, так как при номинальной мощности СДМ температура кристалла выше температуры окружающей среды на 30°C [120], а критическое значение этого параметра для р-п-перехода используемых кристаллов составляет 125°C.

Измерение значений спектральных составляющих, координат цветности и коррелированной цветовой температуры осуществлялось с использованием

прибора «Спектроколориметр ТКА-ВД» с основной относительной погрешностью не более $\pm 10\%$.

При увеличении температуры в диапазоне от 0 (сплошная линия на графике) до 90°C (пунктирная линия на графике) происходит сдвиг максимума спектра излучения, соответствующего синему цвету свечения кристалла, на 5 нм в сторону больших длин волн (рисунок 3.17), однако увеличение температуры не повлияло на интенсивность спектра люминофора. Из этого можно сделать вывод, что эффекта температурного тушения люминофора не наблюдается. Полученный результат подтверждает данные, приведенные в работе [32].

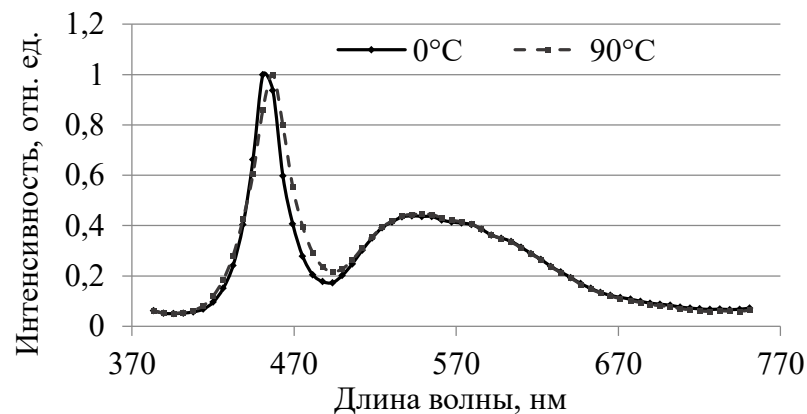


Рисунок 3.17 – Зависимость спектра от температуры окружающей среды

Экспериментально установлено, что увеличение температуры сопровождается снижением яркости СДМ (рисунок 3.18): при нагревании от 0°C до 90°C яркость снижается на 11%.

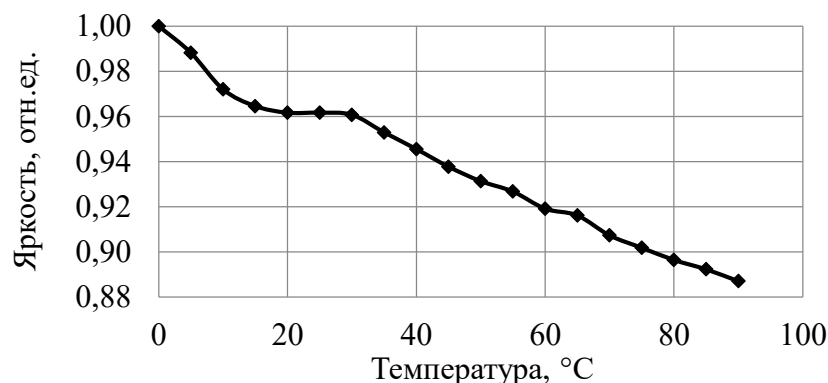


Рисунок 3.18 – Зависимость яркости от температуры окружающей среды при стабилизированном значении силы тока 10 мА

Определены температурные зависимости коррелированной цветовой температуры (КЦТ) и доминирующей длины волны (рисунок 3.19). Доминирующая длина волны при фиксированном прямом токе СДМ на участке температур от 0°С до 90°С линейно возрастает.

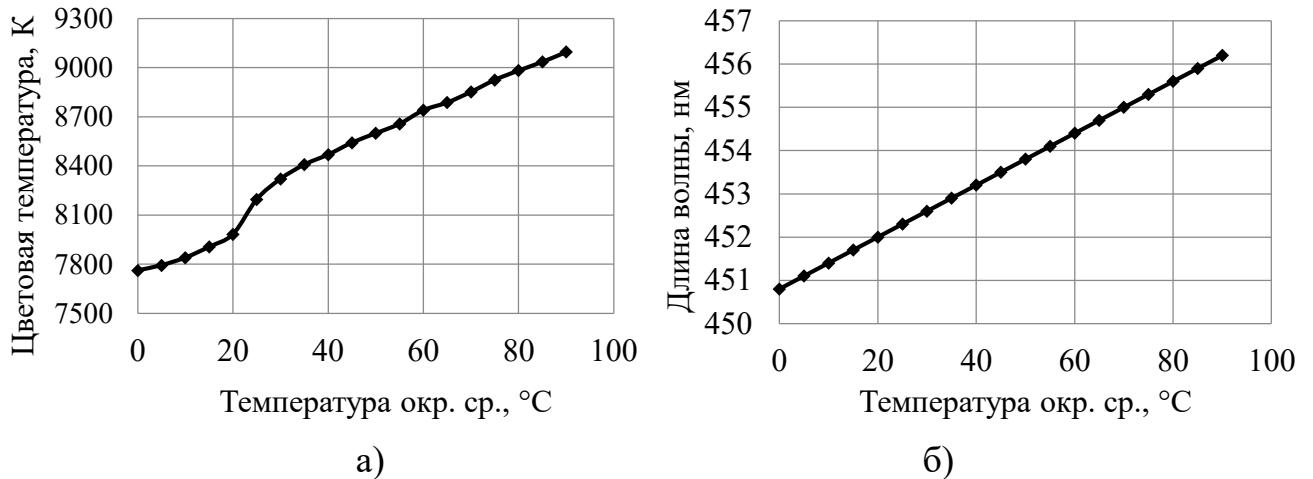


Рисунок 3.19 – Зависимости КЦТ (а) и доминирующей длины волны (б) от температуры

Определено численное значение теплового сопротивления основание СДМ – среда. Для этого измерено семейство вольт-амперных характеристик СДМ в условиях размещения СДМ на поверхности элемента Пельтье, причём, основание СДМ плотно прижималось к поверхности элемента. В этом случае температура на поверхности элемента Пельтье равнялась температуре основания СДМ. На рисунке 3.20 представлено семейство ВАХ СДМ при значениях температуры 0°С (1), 25°С (2), 85°С (3).

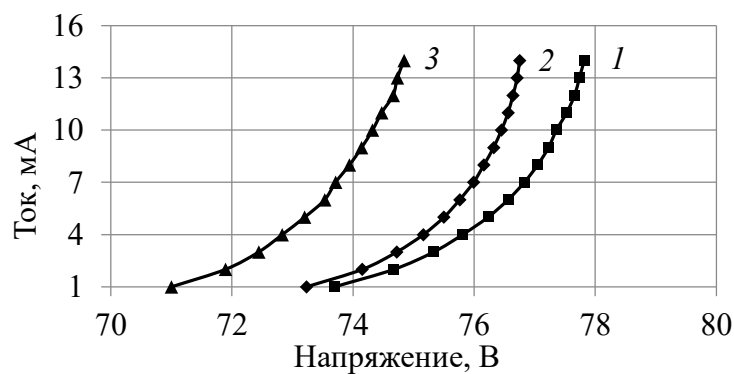


Рисунок 3.20 – Зависимость тока от напряжения при разных значениях температуры

В результате измерений установлено, что в диапазоне токов от 1 до 15 мА вольт-амперная характеристика исследуемого образца не выходит на линейный участок, так как значение тока не достигает тока насыщения в каждом кристалле.

Затем проведены измерения зависимости напряжения от температуры для СДМ, расположенного в лабораторной электропечи, при значении прямого тока 10 мА (рисунок 3.21). При расположении СДМ в лабораторной электропечи, температура основания превышала температуру внутри печи вследствие нагрева от кристаллов.

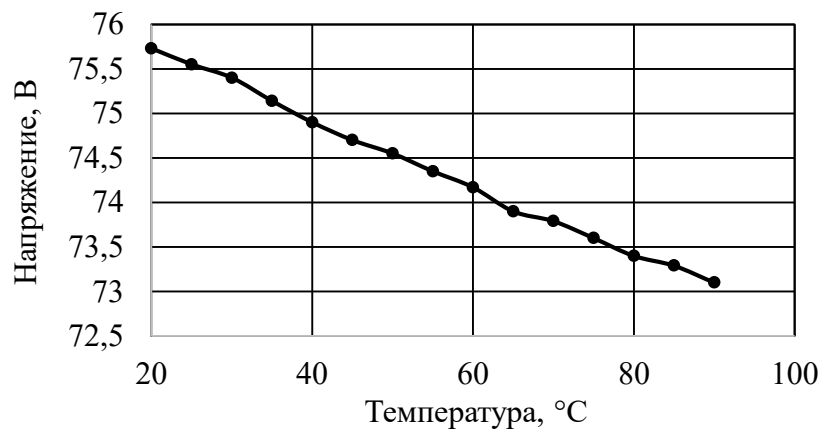


Рисунок 3.21 – Зависимость напряжения от температуры для СДМ при значении прямого тока 10 мА

Из рисунка 3.20 следует, что при температуре 85°C на элементе Пельтье значение напряжения на СДМ составляет 74,3 В. При той же температуре окружающей среды в печи (рисунок 3.21) значение напряжения на СДМ составляет 73,29 В. Для излучающих нитридных кристаллов зависимость изменения прямого напряжения от изменения температуры составляет [134]:

$$dU / dT = -(1,76 - 2,3) мВ / К, \quad (3.11)$$

где U – прямое напряжение;

T – температура р–n-перехода.

Учитывая (3.11), определим разность температур основания СДМ и окружающей среды:

$$\Delta T = \frac{74,3 - 73,29}{n \cdot dU/dt} = (15,6 - 20,5)K, \quad (3.12)$$

где $n = 28$ – количество кристаллов.

Значение теплового сопротивления основание СДМ – среда R_t можно определить по формуле:

$$R_t = \frac{\Delta T}{P} = (22 - 29)K / Bm \quad (3.13)$$

Полученное экспериментально значение теплового сопротивления основание СДМ – среда (22–29) К/Вт хорошо согласуется с полученным теоретическим значением (30 К/Вт), расчёт которого описан в работе [120].

3.5 Ресурсные испытания макетов светодиодных ламп

В рамках прикладных научных исследований были разработаны и изготовлены макетные образцы светодиодной лампы мощностью 4 Вт и проведены измерения светового потока (рисунок 3.22, а), световой отдачи (рисунок 3.22, б) и спектра излучения (рисунок 3.23) при длительной наработке [123, 124].

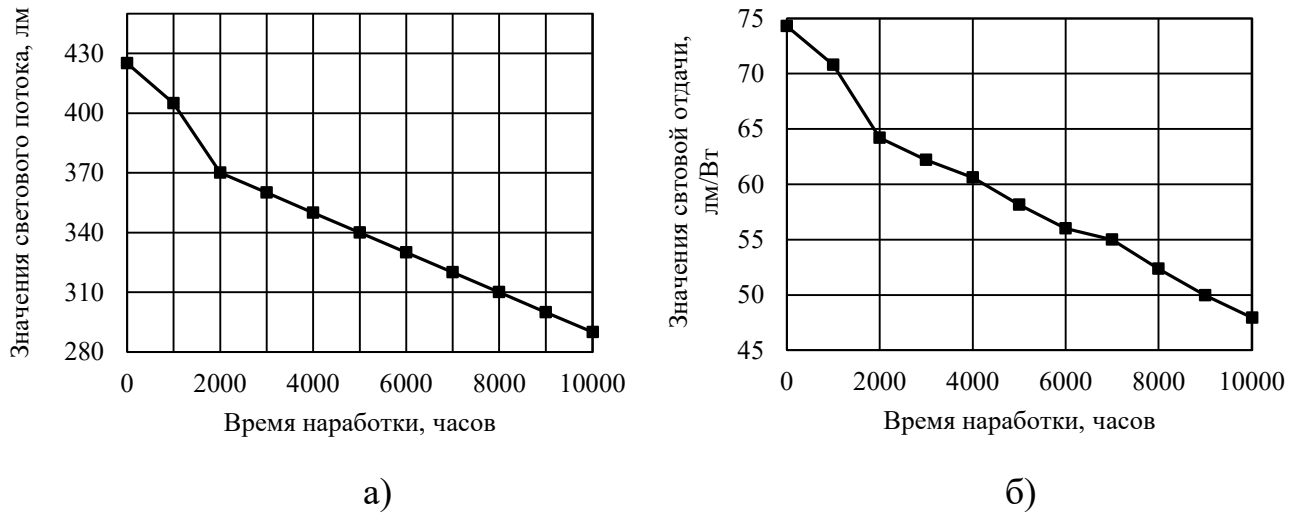


Рисунок 3.22 – Результаты измерений характеристик в процессе испытаний

За 10000 часов световой поток снизился с 425 до 290 лм (на 31 %). Световая отдача снизилась на 26,4 лм/Вт (35 %).

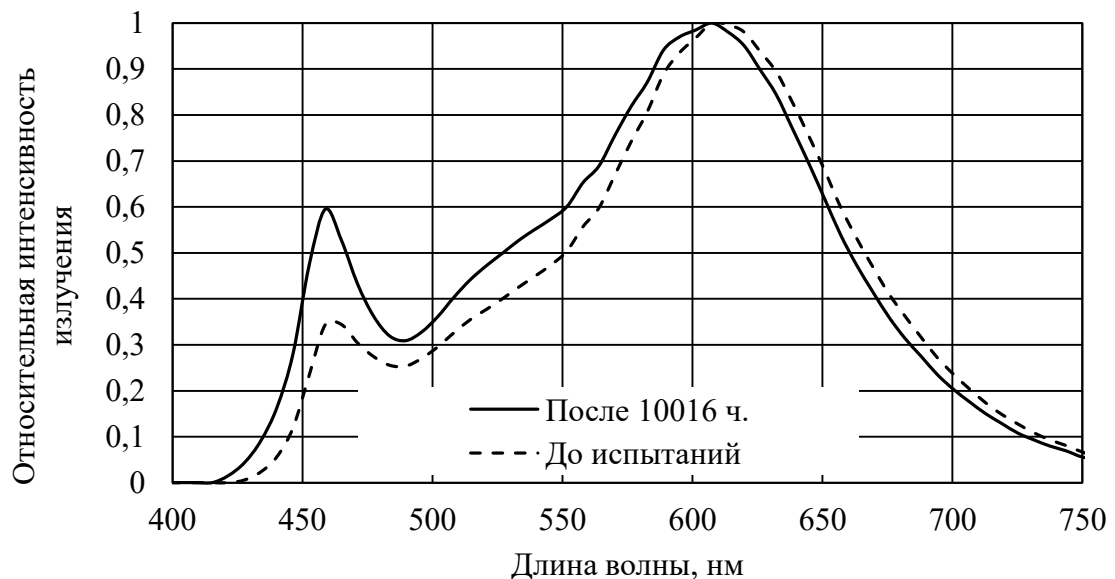


Рисунок 3.23 – Результаты измерений спектра излучения светодиодной лампы до и после 10000 часов

После 10 тысяч часов наработки, синяя составляющая спектра светодиодной лампы – излучение кристалла, относительно спектра излучения люминофора увеличилась по сравнению с исходным спектром на 0,25 относительных единиц (41 %), что связано с деградацией люминофорной композиции.

Исследования показали, что все основные параметры светодиодных ламп снижаются в процессе длительной наработки. Однако, за время 10000 часов работы ни один из параметров не достиг критерия отказа лампы (снижение на 50%).

Проведены испытания при воздействии повышенной температуры окружающей среды [125-127]. Выбраны 10 макетов светодиодных ламп, проведены измерения значений светового потока и потребляемой мощности. Макеты ламп установили в цоколи, смонтированные в камере, и установили температуру 45 °С. После 1000 часов непрерывной работы проведены повторные измерения параметров (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Среднеарифметические значения параметров макетов ламп

Испытываемый параметр	До испытаний	После испытаний
Световой поток, лм	400±40	390±40
Потребляемая мощность, Вт	3,77±0,1	3,72±0,1

Установлено, что среднеарифметические значения параметров светового потока, потребляемой мощности и световой отдачи 10 шт. макетов светодиодных ламп изменились незначительно.

Проведены испытания устройства питания лампы в соответствии с методикой ГОСТ ИЕС 62612-2019 п.11.3.3 выбраны 10 макетных образцов светодиодных ламп мощностью 4 Вт. При испытательном напряжении лампа выдерживалась 30 с. во включенном состоянии и 30 с. в выключенном состоянии. Нормированный срок службы светодиодной лампы составляет 15 000 часов, соответственно количество циклов включения/ выключения должно быть 7 500. Испытания проводились в автоматическом режиме при использовании специально

разработанного устройства (ЕГВА.421417.701) для испытания на определение срока службы встроенного источника питания лампы. Лампы устанавливали в устройство для испытания и включали в сеть переменного тока 220 В 50 Гц. Число циклов определяли исходя из времени наработки лампы из расчета 60 циклов в час.

Результаты испытаний показали, что количество циклов при испытании устройства питания светодиодной лампы составило 19440 без потери работоспособности. Следовательно, по ГОСТ ИЕС 62612-2019 п.11.3.3 срок службы источника питания лампы составляет не менее 38,9 тысяч часов.

В рамках проведения диссертационного исследования решены поставленные задачи и получены следующие результаты:

1. Результативно применён метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе Ansys, для расчёта тепловых характеристик светодиодных модулей, содержащих последовательности GaN/InGaN кристаллов, и светодиодных ламп. Математическая модель распределения температуры в системе последовательность полупроводниковых кристаллов – подложка – заполняющий колбу газ – колба светодиодной лампы позволяет учесть неравномерность расположения кристаллов на подложке, влияние заполняющего колбу газа.

2. Установлено, что размещение в конструкции светодиодной лампы линзы из оптически прозрачного, теплопроводящего материала позволяет одновременно снизить температуру светодиодных модулей до 10% и уменьшить неравномерность углового распределения силы света лампы.

3. Разработаны новые устройства:

а) светодиодная лампа с линзой, одновременно обеспечивающая улучшенный тепловой режим GaN/InGaN кристаллов и меньшую неравномерность пространственного распределения силы света светодиодной лампы;

б) светодиодный источник излучения, содержащий колбу, заполненную газом, имеющим низкий коэффициент вязкости и высокий коэффициент теплопроводности, в которой размещен держатель со штенгелем и стойкой сердечника, на которой закреплена объёмная излучающая свет конструкция из светодиодных модулей, цоколь и устройство питания, электрически соединённое по переменному току с цоколем, а положительным и отрицательным электродами со светодиодными модулями, отличающийся тем, что внутренняя поверхность колбы покрыта оптически прозрачным электропроводящим материалом, дополнительно введен источник свободных электронов, температурно-

сопряженный со светодиодными модулями, причем оптически прозрачный электропроводящий материал электрически соединен с положительным электродом устройства питания, а источник свободных электронов – с отрицательным. Предложенная новая конструкция позволяет до 15% уменьшить температуру GaN/InGaN кристаллов при увеличении теплопроводности заполняющего газа от 0,15 до 0,25 Вт/(м·К) в светодиодной лампе со стеклянной колбой.

Таким образом, выполненная работа заключается в разработке научно-технических основ проектирования светодиодных ламп, содержащих последовательность GaN/InGaN кристаллов, совокупность которых 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, в разработке, создании и внедрении нитевидных светодиодных модулей и светодиодных ламп с улучшенными тепловыми параметрами, что позволило увеличить надежность и срок службы этих устройств.

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят:

- в разработке макета светодиодной лампы со СДМ и заполнением колбы лампы электронным газом;
- в проведении экспериментального исследования и оценке тепловых характеристик макетов светодиодной лампы, колба которой заполнена электронным газом;
- в разработке новых светотехнических устройств на основе нитевидных СДМ с улучшенными тепловыми и световыми характеристиками.

Список использованных источников

- 1 Key world energy statistics / Fatih Birol, Executive Director, International Energy Agency – Paris: IEA Publications, 2017. – 97 p.
- 2 Статистический ежегодник мировой энергетики [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/> , свободный (дата обращения 08.07.2020).
- 3 Производство электроэнергии в регионах и странах мира [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.eeseaec.org/contact-us/obsie-obemnye-tehniko-ekonomiceskie-pokazateli/proizvodstvo-elektroenergii-v-regionah-i-stranah-mira> , свободный (дата обращения 08.07.2020).
- 4 Сысоева, Е. Внедрение методики расчета уровня энергоэффективности источников света / Евгения Сысоева, Татьяна Рожкова // Стандарты и качество. – 2011. – №2 (884). – С. 38-41.
- 5 Башмаков, И.А. Энергопотребление зданий сферы услуг: мировой опыт / И.А. Башмаков // Энергосбережение. – 2015. – №5. – С. 24-29.
- 6 Алексеев, Д. Новый взгляд на роль освещения [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.kommersant.ru/doc/2469191> , свободный (дата обращения 08.07.2020).
- 7 Энергосбережение. [Электронный ресурс] // ОАО "Московская городская электросетевая компания". – Режим доступа <http://www.energsovet.ru/stat52.html> , свободный (дата обращения 08.07.2020).
- 8 Narukawa, Y. Recent progress of high efficiency white LEDs / Y. Narukawa, J. Narita, T. Sakamoto, T. Yamada, H. Narimatsu, M. Sano, and T. Mukai // Phys. Status Solidi., A Appl. Mater. Sci. – 2007. – No. 204(6). – P. 2087-2093.
- 9 Narukawa, Y. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy / Y. Narukawa, M. Ichikawa, D. Sanga, M. Sano, and T. Mukai // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. –No. 43. – P. 354002 (6pp).

10 Туркин, А. Обзор новых продуктов в линейке мощных и сверхъярких светодиодов Lumileds / А. Туркин // Полупроводниковая светотехника. – 2016. – №5. – С. 52-57.

11 Bhandarkar, V. LED lighting market holds steady in 2012 [Электронный ресурс]. / V. Bhandarkar, E. Shum L. Peters // LEDs Magazine. – 2012. – № 9(9) – Режим доступа <https://www.ledsmagazine.com>. , свободный (дата обращения: 15.03.2020)

12 Гонин, М. Спасительная прохлада, или теплоотвод для мощных светодиодных матриц [Электронный ресурс] / М. Гонин // Новости электроники + светотехника. – 2013. – № 2. – Режим доступа: <https://www.compel.ru>. , свободный. (дата обращения: 28.02.2018).

13 Тукшаитов, Р. Как обеспечить заявленный срок службы светодиодных ламп / Р. Тукшаитов, Исыхакэфу // Полупроводниковая светотехника. – 2016. – №3. – С. 8-11.

14 Lee, J.C. Temperature and current dependences of electroluminescence from InGaN/GaN multiple quantum wells / J.C. Lee, Y.F. Wu, Y.P. Wang, T.E. Nee // J. Cryst. Growth (Paris). – 2008. – Vol. 310, No. 23. – P. 5143-5146.

15 Feng, W. Simulation and Optimization on Thermal Performance of LED Filament Light Bulb / W. Feng, B. Feng, F. Zhao, B. Shieh, R. Lee // Proceedings of the 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA 2015). – 2015. – Vol. 12. – P. 88-92.

16 Chunlin, X. Thermal dissipation enhancement of LED filament bulb by ionic wind / Chunlin Xu, Zejeng Zhang, Jingcao Chu, Jiading Wu, Xiang Lei // 17th International Conference on Electronic Packaging Technology. – 2016. – P. 1212-1215.

17 Jie, L. Numerical Analysis and Optimization of Thermal Performance of LED Filament Light Bulb / Jie Liu, Chunlin Xu, Huai Zheng, Sheng Liu // 67th Electronic Components and Technology Conference. – 2017. – P. 2243-2248.

18 Huang, L. Cooling Strategy for LED Filament Bulb utilizing Thermal Radiation Cooling and Open Slots Enhancing Thermal Convection / Linjuan Huang, Yuchou Shih, Frank Shi // 16th IEEE IThERM Conference. – 2017. – P. 1030-1033.

19 Озеркин, Д.В. Топологическая термокомпенсация светодиодных линейных модулей филаментных ламп / Д. В. Озеркин, Д. Г. Старосек, В. И. Туев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61. – №6 (726). – С. 156-163.

20 Старосек, Д.Г. Обеспечение температурной стабильности ламп с ультратонкими светодиодными нитями / Д.Г. Старосек, Д.В. Озёркин. – Красноярск: ВМНО. – 2015. – С. 922-938.

21 Старосек, Д. Г. Локальный перегрев светодиодной нити / Д. Г. Старосек // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – Томск. – 2018. – С.305-307.

22 Starosek, D. Fundamental problem of heat transmission in the closed volume of inert gas / D. Starosek, A. Khomyakov, D. Ozerkin, V. Tuev, A. Chulkov // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2019. – DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729621

23 Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

24 Дульнев, Г.Н. Теория тепло- и массообмена: учеб. Пособие / Г.Н. Дульнев. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.

25 Кудинов, В.А. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник для академического бакалавриата / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2019. – 454 с.

26 Дульнев, Г.Н. Методы расчёта теплового режима приборов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.

27 Дульнев, Г.Н. Основы теории тепломассообмена / Г.Н. Дульнев, С.В. Тихонов. – СПб.: Университет ИТМО, 2010. – 93 с.

28 Кузнецов, Г.В. Моделирование пространственного теплопереноса в замкнутом объеме с локально сосредоточенными источниками тепловыделения / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 69-72.

29 Кузнецов, Г.В. ОБ Одном подходе к математическому моделированию тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37. – № 2. – С. 150-158.

30 Сергеев, В.А. Теплоэлектрическая модель гетеропереходного светодиода с учетом тепловыделения в подложке / В.А. Сергеев, А.М. Ходаков // Прикладная математика и механика (Ульяновск). – 2017. – № 11. – С. 253-257.

31 Сергеев, В.А. Закономерности и особенности токовых зависимостей теплового сопротивления переход-корпус мощных InGaN/GaN светодиодов / В.А. Сергеев, В.И. Смирнов, И.В. Фролов, А.М. Ходаков // Ученые записки физического факультета московского университета. – 2014. – № 2. – С. 12-16.

32 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 ТУСУР. – 2011. – № 2(24). – Ч. 2. – С. 55-58.

33 Лукаш, В.С. Тепловой режим приборных светодиодных ламп ЛПМ 26 / В.С. Лукаш, М.А. Романова, С.В. Смирнов // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 111–113.

34 Пуговкин, А.В. Энергетические характеристики светодиодов и светодиодных ламп / А.В. Пуговкин, В.С. Степной, А.Ю. Антонова, М.А. Еремич // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24). – Ч. 2. – С. 164-168.

35 Жидик, Ю.С. Расчет теплоотводящего и несущего покрытия при изготовлении светодиодов / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, Д.Д. Каримбаев // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24). – Ч. 2. – С. 73-76.

36 Еханин, С.Г. Оценка локального перегрева в гетероструктуре светоизлучающего диода на основе GaN / С.Г. Еханин, М.Н. Романовский, А.А. Томашевич // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2(26). – Ч. 1. – С. 57-60.

37 Гончарова, Ю.С. Тепловой режим полупроводниковых источников света при ускоренных испытаниях на надёжность и долговечность: дис. на соиск.учён. степ. канд. техн. наук (05.11.07) / Гончарова Юлия Сергеевна; ТУСУР. – Томск, 2016. – 145 с.

38 Короткова, К.В. Температурная и временная стабильность колориметрических параметров полупроводниковых источников света / К.В. Короткова, М.А. Романова, С.В. Смирнов. – Томск: Россия, 2017. – С. 38-41.

39 Астахов, А.А. Оптимизация тепловых режимов в конструкциях световых приборов на полупроводниковых источниках света / А.А. Астахов, Д.Д. Каримбаев, А.О. Мисюнас, В.Г. Христюков // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24). – Ч. 2. – С. 81-89.

40 Каримбаев, Д.Д. Расчет теплоотводящего и несущего покрытия при изготовлении светодиодов / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, Д.Д. Каримбаев // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24). – С. 73-76.

41 Воропаев, М.В. Тепловые сопротивления светодиодных матриц. / М.В. Воропаев, В.Н. Корякин, Ю.А. Хотненко, М.Ю. Чугулин, Д.Д. Каримбаев // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. – 2010. – С. 447-450.

42 Вилисов, А.А. Влияние конструктивных особенностей светодиодов на их тепловое сопротивление / А.А. Вилисов, К.В. Тепляков, В.С. Солдаткин // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XII Международной научно-практической конференции. – Ч. 1. – Томск, 2017. – С. 287-289.

43 Воропаев, М.В. Тепловой анализ светового модуля на основе светоизлучающей матрицы с применением теплорассеивающей пластмассы / М.В. Воропаев, Д.Д. Каримбаев, В.А. Харенков, А.П. Коханенко // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Том 56. – № 9-2. – С. 55-57.

44 Воропаев, М.В. Тепловой анализ светодиодных матриц видимого диапазона с силиконовой заливкой и люминофором / М.В. Воропаев, Д.Д. Каримбаев, Ю.А. Хотненко, А.П. Коханенко, В.А. Харенков // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26). – С. 162-164.

45 Ефремов, А.А. Влияние джоулева разогрева на квантовую эффективность и выбор теплового режима мощных голубых InGaN/GaN светодиодов / А.А. Ефремов, Н.И. Бочкарева, Р.И. Горбунов, Д.А. Лавринович,

Ю.Т. Ребане, Д.В. Тархин, Ю.Г. Шретер // Физика и техника полупроводников (СПб). – 2006. – Т. 40, вып. 5. – С. 621-627.

46 Бочкарева, Н.И. Влияние трансформации точечных дефектов при джоулевым разогреве на эффективность светодиодов с квантовыми ямами InGaN/GaN / Н.И. Бочкарева, А.М. Иванов, А.В. Клочков, В.А. Тарала, Ю.Г. Шретер // Письма в журнал технической физики (СПб). – 2016. – Т. 42. – № 22. – С. 1-8.

47 Дёч, Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа / Г. Дёч. – М.: Наука, 1965. – 288 с.

48 Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований. Том 1. Преобразования Фурье, Лапласа, Меллина. / Г. Байтмен, А. Эрдейи. – М.: Наука, 1969. – 344 с.

49 Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований. Том 2. Преобразования Бесселя. Интегралы от специальных функций. / Г. Байтмен, А. Эрдейи. – М.: Наука, 1970. – 328 с.

50 Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И. П. Копылова. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.

51 Лукашевич, А.А. Современные численные методы строительной механики: Учебное пособие. / А.А. Лукашевич. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2003. – 135 с.

52 Petr Kabele, Tomáš Pokorný and Robert Koska. Finite element analysis of building collapse during demolition [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/228713565_Finite_Element_Analysis_of_Building_Collapse_during_Demolition, свободный (дата обращения 18.05.2019)

53 Finite Element Analysis – Applications in Mechanical Engineering. / Jamal Samir, Jamal Echaabi, Mohamed Hattabi et al. – Rijeka: InTech, 2012. – 380 p.

54 Mahendran, M. Applications of Finite Element Analysis in Structural Engineering / M. Mahendran, Siva Prasad, N. and Sekar, A.S. and Krishnapillai, S., Eds. // Proceedings International Conference on Computer Aided Engineering. – 2007. – P. 38-46.

55 Rahman, W. Structural Analysis of a Container Vessel Hatch Cover by Finite Element Method / Waliur Rahman, Md. Rauful Islam Sworan, Md. Riad Khan and Md. Sadiqul Barea // International Conference on Mechanical Engineering AIP Conf. Proc. – 2018. – Vol. 1980. – P. 030005-1-030005-8.

56 Zienkiewicz, O.C. The Finite Element Method for Fluid Dynamics / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, P. Nithiarasu. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. – 584 p.

57 Hsichun, M.H. A finite-element method for calculating aerodynamic coefficients of a subsonic airplane / M. Hua Hsichun // J. AIRCRAFT. – 1973. – Vol. 10. – No. 7. – p. 422-426.

58 Chen, C. Aerodynamic design of airfoils based on variable-domain variational finite element method / C. Chen, G. Liu // J. of Shanghai Univ. – 2005. – No 9. – p. 210-215.

59 Chang-Chou, H. Extensions to the finite element method for thermal analysis of underground cable systems / Hwang Chang-Chou, Yi-Hsuan Jiang // Electric Power Systems Research. – 2003. – Vol. 64. – Issue 2. – p. 159-164.

60 Maximov, S. Analysis of underground cable ampacity considering non-uniform soil temperature distributions / S. Maximov, V. Venegas, J.L. Guardado, E.L. Moreno, R. López // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 132. – p. 22-29.

61 Niu, H. Converter-level FEM simulation for lifetime prediction of an LED driver with improved thermal modelling / H.Niu, H.Wang, X.Ye, S.Wang, F.Blaabjerg // Microelectronics Reliability. – 2017. – Vol. 76-77. – p. 117-122.

62 Christensen, A. Thermal management methods for compact high power LED / A. Christensen, M. Ha, S. Graham. – San Diego: SPIE, 2007. – P. 66690Z-1- 66690Z-19.

63 Shen, W. Analysis of wave motion in one-dimensional structures through fast-Fourier-transform-based wavelet finite element method / Wei Shen, Dongsheng Li, Shuaifang Zhang Jinping Ou // Journal of Sound and Vibration. – 2017. – Vol. 400. – p. 369-386.

64 Yang, Z. Wave motion analysis and modeling of membrane structures using the wavelet finite element method / Zhi-Bo Yang, Xue-Feng Chen, Yong Xie, Hao Zuo, Hui-Hui Miao, Xing-Wu Zhang // Applied Mathematical Modelling. – 2016. – Vol. 40. – Issue 3. – p. 2407-2420.

65 Yang, Z. Wave motion analysis in arch structures via wavelet finite element method / Zhibo Yang, Xuefeng Chen, Xiang Li, Yongying Jiang, Huihui Miao, Zhengjia He // Journal of Sound and Vibration. – 2014. – Vol. 333. – Issue 2. – p. 446-469.

66 Huang, H. Finite element simulations of second order wave resonance by motions of two bodies in a steady current / Haocai Huang, Chizhong Wang // Ocean Engineering. – 2020. – Vol. 196. – p. 1-16.

67 Huang, L. Finite element analysis as a tool for crossflow membrane filter simulation / Lihan Huang, Michael T. Morrissey // Journal of Membrane Science. – 1999. – Vol. 155. – Issue 1. – p. 19-30.

68 He, Y. Finite element analysis on fluid filtration in system of permeable curved capillary and tissue / Ying He, Ryutaro Himeno // Journal of Mechanics in Medicine and Biology. – 2012. – Vol. 12(4). – p. 1250077-1-1250077-20.

69 Афонин, К.Н. Методы теплового моделирования электронных приборов / К.Н. Афонин // Научная сессия ТУСУР–2018: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / В-Спектр. –Томск, 2018. – Ч.2. – С.161-164.

70 Никифоров, С. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты. Оптоэлектроника. – 2005. – № 5. – С. 16-24.

71 Никифоров С.Г. Проблемы, теория и реальность светодиодов // Компоненты и технологии. – СПб.: Файнстрит. – 2005. -№5. – С. 176-185.

72 Пат. 102746 U1 Российская Федерация, МПК F21S 8/09 (2006/01). Светодиодная лампа (варианты) / Голубев В.В., Алексеев А.П., Кассирова Г.В., Малофеева Л.А.; заявитель и патентообладатель ООО «Руслед». – № 2010143699/07, заявл. 2010.10.27; опубл. 2011.03.10. – 3 с.

73 Пат. 2546469 Российская Федерация, МПК F21V 19/00 (2006/01). Светодиодная лампа / ГЭ Шичао, ГЭ Техань, ЛЮ Хуабинь; опубл.01.09.11.

74 Старосек, Д.Г. Зависимость теплового режима и светового потока светодиодной лампы от газового наполнения колбы / Д.Г. Старосек, А.Ю. Хомяков, К.Н. Афонин // Сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Перспективы развития фундаментальных наук – Томск. – 2016. – Т.1. – С. 265-267.

75 Старосек, Д.Г. Зависимость температурного режима светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением от количества светодиодных нитей / Д.Г. Старосек, А.Ю. Хомяков, Ю.В. Ряполова, А.Ю. Олисовец. – Томск: СТТ, 2016. – С. 540-541.

76 Afonin, K.N. LED lamp design optimizing on minimum non-uniformity of light intensity distribution in space / K.N. Afonin, A.Y. Olishovets, Y.V. Ryapolova, V.S. Soldatkin, D.G. Starosek, V.I. Tuev, V.G. Hristyukov // Actual problems of electronics instrument engineering (APEIE), 2016 13th international scientific technical conference, 3-9 oct. 2016. ISBN 978-1-5090-4069-8. – P. 153-155. – DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806435

77 Абрашкина, М. Филамент светодиодный на смену вольфрамовой спирали / М. Абрашкина, И. Доброзраков, И. Кошин, Т. Рожкова // Полупроводниковая светотехника. – 2015. – №4,. – С. 6-10.

78 Hibbard, D.L. Low resistance high reflectance contacts to p-GaN using oxidized Ni/Au and Al or Ag / D.L. Hibbard, S.P. Jung, C. Wang, D. Ullery, Y.S. Zhao, H.P. Lee, W. So, H. Liu // Applied Physics Letters. – 2003. – Vol. 83, 2. – P. 311-314.

79 Fischer, P. Spatially Resolved Imaging of the Spectral Emission Characteristic of an InGaN/GaN-Multi Quantum Well Light-Emitting Diode by Scanning Electroluminescence Microscopy / Peter Fischer, Jürgen Christen, Margit Zacharias, Veit Schwegler, Christoph Kirchner, Markus Kamp // Japanese Journal of Applied Physics. – 2000. – Vol. 39. – P. 2414-2416.

80 Arai, T. Development of Pt-based ohmic contact materials for p-type GaN / T. Arai, H. Sueyoshi, Y. Koide, M. Moriyama, M. Murakami // Journal of Applied Physics. – 2001. – Vol. 89, 5. – P. 2826-2831.

81 Бочкарева, Н.И. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградации голубых светодиодов / Н.И. Бочкарева, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане, Р.И. Горбунов, А.В. Клочков, Ю.Г. Шретер // ФТП. – 2006. – Т. 40, 1. – С. 122-128.

82 Закгейм А Л, Левинштейн М Е, Петров В П, Черняков А Е, Шабунина Е И, Шмидт Н М Низкочастотный шум в исходных и деградировавших синих InGaAs/GaN- светодиодах // ФТП. – 2012. – Т. 46, 2. – С. 219-223.

83 Shmidt, N M. Mechanisms behind efficiency droop and degradation in InGaN/GaN LEDs / N.M. Shmidt, A.A. Greshnov, A.E. Chernyakov, M.E. Levinshtein, A.L. Zakgeim, E.I. Shabunina // Physica Status Solidi (c). – 2013. – Vol. 10, 3. – P. 332-334.

84 Черняков, А.Е. Особенности развития деградации внешнего квантовой эффективности мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур / диссертация на соискание учёной степени канд. ф-м. наук, ФТИ им. Иоффе РАН. – Санкт-Петербург. – 2014. – 157с.

85 Старосек, Д.Г. Стабилизация теплового и электрического режимов в нитевидных модулях светоизлучающих GaN/InGaN диодов / диссертация на соискание учёной степени канд. техн. наук, ТУСУР. – Томск. – 2019. – 124 с.

86 Физические величины. Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

87 Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др.; Под общей ред. А. С. Зубченко – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

88 Корицкий, Ю.В. Справочник по электротехническим материалам / Ю.В. Корицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.

89 Sichel, E. Thermal Conductivity of GaN, 25-360 K / E. Sichel, J. Pankove // J.Phys.Chem. Solids. – 1977. – Vol. 38. – No. 3. – P. 330-330.

90 Mion, C. Thermal Conductivity, Dislocation Density and GaN Device Design / C. Mion, J. Muth, E. Preble, and D. Hanser // Superlattices & Microstructures. – 2006. – Vol. 40. – No. 4-6. – P. 338-342.

91 Florescu, D. Thermal Conductivity of Fully and Partially Coalesced Lateral Epitaxial Overgrown GaN/Sapphire (0001) by Scanning Thermal Microscopy / D. Florescu, V. Asnin, F. Pollak, A. Jones, J. Ramer, M. Schurman, I. Ferguson // *Appl.Phys.Lett.* – 2000. – Vol. 77. – No. 10. – P. 1464-1466.

92 Jezowski, A. Thermal Conductivity of GaN Crystals in 4.2-300 K range / A. Jezowski, B. Danilchenko, M. Bockowski, I. Grzegory, S. Krukowski, T. Suski, and T. Paszkiewicz, // *Solid-State Comm.* – 2003. – Vol. 128. – No. 2-3. – P. 69-73.

93 Lee, H.K. Thermal Analysis of InGaN/GaN Multiple Quantum Well Light Emitting Diodes with Different Mesa Sizes / Hee Kwan Lee and Jae Su Yu // *Japanese Journal of Applied Physics.* – 2010. – No. 49. – P. 04DG11-1-04DG11-6.

94 Sahu, S.S. Pyroelectricity and thermal properties of InGaN/GaN heterostructures / Subhranshu Sekhar Sahu, Bijay Kumar Sahoo // *AIP Conf. Proc.* – 2009. – P. 020001-1-020001-4.

95 Kucukgok, B. The structural properties of InGaN alloys and the interdependence on the thermoelectric behavior / Bahadir Kucukgok, Xuewang Wu, Xiaojia Wang, Zhiqiang Liu, Ian T. Ferguson, and Na Lu // *AIP Advances* 6. – 2016. – No 025305. P. 025305-1-025305-7.

96 Wang, J.-C. The effect of junction temperature on the optoelectrical properties of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes / Jen-Cheng Wang, Chia-Hui Fang, Ya-Fen Wu, Wei-Jen Chen, Da-Chuan Kuo, Ping-Lin Fan, Joe-Air Jiang, Tzer-En Nee // *Journal of Luminescence.* – 2012. – Vol. 132. – Issue 2. – P. 429-433.

97 Tsai, P.-Y. Thermal Characteristics of InGaN/GaN Flip-Chip Light Emitting Diodes with Diamond-Like Carbon Heat-Spreading Layers / Pai-Yang Tsai, Hou-Kuei Huang, Chien-Min Sung, Ming-Chi Kan, and Yeong-Her Wang // *International Journal of Photoenergy.* – 2014. – Article ID 829284. – P. 1-5.

98 Ермошин, И.Г. Разработка основ технологии получения эпитаксиальных слоев GaN, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений для светоизлучающих структур / автореферат диссертации на соискание учёной степени канд. техн. наук, ФГОУ ВПО

«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»». – Москва. – 2009. – 20с.

99 Рост эффективности светодиодов по сравнению с другими источниками света [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.axiomasveta.com/info/rost_effektivnosti_svetodiodov_po_sravneniyu_s_drugimi_istochnikami_sveta/ , свободный (дата обращения: 20.06.2020).

100 Радомский, Н. Сравнительный анализ ведущих производителей белых светодиодов [Электронный ресурс] / Н. Радомский // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 4. – Режим доступа: https://www.led-e.ru/articles/svetodiod/2010_4_6.php , свободный (дата обращения: 20.06.2020).

101 Туркин, А. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике / А. Туркин // Компоненты и технологии – 2011. – №5,. – С. 6-10.

102 Exploring Engineering: An Introduction to Engineering and Design. 3rd Edition / Philip Kosky, Robert Balmer, William Keat, George Wise. – Academic Press, 2012. – 486 с.

103 Vargas, R.S. Thermal analysis and control for heating of an extrusion die / R.S. Vargas, V. Gonda, and L.C. Ruiz // Bánki Közlemények. – 2018. – No. 1(1). P. 63-66.

104 Kurganov, V.A. Heat transfer coefficient [Электронный ресурс]. / V.A. Kurganov // Thermopedia – Режим доступа: <http://thermopedia.com/content/841/> , свободный (дата обращения: 20.06.2020).

105 Newton's Law of Cooling [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/convection-convective-heat-transfer/newtons-law-of-cooling/> , свободный (дата обращения: 20.06.2020).

106 Афонин, К.Н. Результаты моделирования тепловых характеристик светодиодного излучающего элемента / К.Н. Афонин, М.В. Андреева, Е.С. Ганская, К.В. Тепляков // Электронные средства и системы управления: материалы докладов

XII Международной научно-практической конференции (28–30 ноября 2018 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – С. 252-255 с.

107 Афонин, К.Н. Моделирование тепловых характеристик светодиодной лампы в колбе А60 / К.Н. Афонин, К.В. Тепляков // Научная сессия ТУСУР–2019: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Сборник избранных статей. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч.1. – С.292-294.

108 Afonin, K.N. Simulation of thermal characteristics of the LED lamp with a V36 bulb / K.N. Afonin // Научная сессия ТУСУР–2019: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч.4. – С.77-80.

109 Афонин, К.Н. Моделирование тепловых характеристик светодиодной лампы в колбе А55 / К.Н. Афонин, К.В. Тепляков // Актуальные проблемы современной науки: материалы VIII Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – С. 69-72.

110 Афонин, К.Н. Исследование тепловых характеристик светодиодной лампы на основе светодиодных излучающих элементов / К.Н. Афонин, А.А. Вилисов, А.Г. Саинский, В.С. Солдаткин, К.В. Тепляков // Актуальные проблемы радиофизики: Международная научно-практическая конференция, г. Томск: Издательский дом ТГУ, 2019. – С. 252-258.

111 Ivanov, A.A. Thermal characteristics simulation of LED emitting element containing filled polyaluminosilicate in structure as heat-conducting adhesive coating / A.A. Ivanov, K.N. Afonin, A.S. Chermoshentseva // IOP Pub.: Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. – No. 1488 (2020) 012018. – doi: 10.1088/1742-6596/1488/1/012018.

112 Неверовский, К.А. Тепловое моделирование светодиодной лампы / Ю.В. Ряполова, К.А. Неверовский, Е.О. Постолова, К.Н. Афонин. // Научная сессия ТУСУР–2016: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых // В-Спектр, 2016: в 6 частях. – Ч.2. – С.243-244.

113 Постолова, Е.О. Оптическое моделирование светодиодной лампы / Е.О. Постолова, Ю.В. Ряполова, К.А. Неверовский, К.Н. Афонин // материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск. – 2016. – Ч.2. – С. 244-246.

114 Starosek, D. Dependence on gas of the thermal regime and the luminous flux of LED filament lamp / D. Starosek, A. Khomyakov, K. Afonin, Y. Ryapolova, and V. Tuev. // AIP Conference Proceedings Prospects of fundamental sciences development (pfsd-2016): proceedings of the xiii international conference of students and young scientists air conf. Proc. – 2016. – Vol. 1772. – P. 060008. – DOI: 10.1063/1.4964588.

115 Мицель, А.А. Прикладная математическая статистика. Учебное пособие / А.А. Мицель. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 113 с.

116 Филатова, Л.Ф. Множественная регрессия. Учебное пособие / Л.Ф. Филатова. – Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. – 50 с.

117 Гаврилов, Н. Н. Влияние температуры на световой поток светодиодных светильников ДСП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/articles/vlijanie-temperatury-na-svetovoj-potok-svetodiodny/>, свободный (дата обращения: 20.06.2020).

118 Ланская, А.О. Температурный режим белых светодиодов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://led-displays.ru/rejim_svetodioda.html, свободный (дата обращения: 20.06.2020).

119 Афонин, К.Н. Определение температурной зависимости электрических и световых параметров светодиодных элементов в лампе общего назначения / К.Н. Афонин, В.С. Солдаткин, В.С. Каменкова, Е.С. Ганская, В.И. Туев // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Том 20. – № 3. – С. 148-151.

120 Солдаткин, В.С. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов / В.С. Солдаткин, Ю.В. Ряполова, К.Н. Афонин, А.Ю. Олисовец, В.И. Туев // Доклады ТУСУРа. – 2015. – №3. – С. 55-61.

121 Афонин, К.Н. Срок службы светодиодных ламп / К.Н. Афонин, Ю.В. Ряполова, Д.Г. Старосек // Сборник научных трудов XIII Международной

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Перспективы развития фундаментальных наук – Томск. – 2016. – Т.7. – С. 18-20.

122 Афонин, К.Н. Светодиодная лампа для низковольтных сетей / К.Н. Афонин, В.С. Каменкова, В.С. Солдаткин // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XII Международной научно-практической конференции: в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2016. – 86-87 с.

123 Афонин, К.Н. Ресурсные испытания светодиодной лампы 10 Вт / В.С. Каменкова, К.Н. Афонин // Научная сессия ТУСУР–2017: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 частях. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 3. – С. 123-125.

124 Afonin, K. Operation Characteristics of LED Filament Bulbs / K. Afonin, A. Vilisov, V. Kamenkova, V. Soldatkin, V. Tuev, Yu. Yulaeva // Actual problems of electronics instrument engineering (APEIE), 2018 14th international scientific-technical conference, 2-6 oct. 2018. – P. 376-379. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545675.

125 Афонин, К.Н. Исследование тепловых характеристик светодиодной лампы на основе светодиодных излучающих элементов / К.Н. Афонин, А.А. Вилисов, А.Г. Саинский, В.С. Солдаткин, К.В. Тепляков // Актуальные проблемы радиофизики: Международная научно-практическая конференция, г. Томск: Издательский дом ТГУ, 2019. – С. 252-258.

126 Саинский, А.Г. Исследование тепловых характеристик светодиодного излучающего элемента / А.Г. Саинский, А.И. Черепнев, К.Н. Афонин, К.В. Тепляков // Научная сессия ТУСУР–2019: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Сборник избранных статей. –Томск: В-Спектр, 2019. – Ч.1. – С.289-292.

127 Afonin, K.N. Application of ultrasonic bonding in leds and led lamps production / K.N. Afonin, Y.V. Ryapolova, V.S Soldatkin., V.I. Tuev // Journal of nano- and electronic physics. – 2015. – Vol. 7. – No. 4. – P. 04029.

128 Афонин, К.Н. Особенности применения ультразвуковой сварки в технологии изготовления светодиодов и светодиодных ламп / К.Н. Афонин, Ю.В.

Ряполова, В.С. Солдаткин // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР»*. – Томск. – 2015. – Ч.2. – С. 105-108.

129 Ryapolova, Y.V. Parameters Investigation of Phosphors for Solid State Lighting / Y.V. Ryapolova, V.S. Soldatkin, K.N. Afonin, V.I. Tuev, A.A. Vilisov // *Key Engineering Materials* ISSN: 1662-9795. – 2016. – Vol. 712, – P. 357-361. – doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.712.357.

130 Afonin, K.N. Investigation of phosphor compositions for led filament bulb / K.N. Afonin, A.A. Vilisov, Andreeva M.V., V.S. Soldatkin, V.I. Tuev, Ganskaya E.S. // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. – 2018. – No. 1115 (2018). – P. 052012. – doi: 10.1088/1742-6596/1115/5/052012.

131 Afonin, K. Inkjet-Printed Filament for LED Bulbs / K. Afonin, I. Banshchikova, V. Soldatkin, V. Tuev, A. Schkarupo, Y. Yulaeva. // *Proceedings – 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT 2019)*. – № 8736591. – P. 332-335. – doi: 10.1109/USBEREIT.2019.8736591.

132 Савельев, И.В. Курс общей физики, том I. Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И.В. Савельев. – Москва: Наука, 1970. – 517 с.

133 Разработка энергосберегающей светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания: отчет по этапу 3 «Разработка конструкторской документации (КД) макетных образцов» по Соглашению о предоставлении субсидии от 05 июня 2014 г. № 14.577.21.0061 в 2 томах/ В.И. Туев – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2015. – Том 1 «Научно-технический отчет», 49 с. Том 2 «Приложения», 220 с. – Номер госрегистрации 114100640084. – Инв. № 24.01/03-2015.

134 Шуберт Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт; пер. с англ. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

Приложение А

(справочное)

Копии подтверждающих документов



ООО «Руслед»

634034, Россия, г. Томск, пр. Кирова, 5

ИНН 7017262462 КПП 701701001 ОГРН 1107017009550

+7 (3822) 908-112 (приемная)

+7 (3822) 908-188 (маркетинг)

+7 (3822) 908-151 (отдел продаж)

e-mail: info@leadlight.group

www.leadlight.group



УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Руслед»

В.В. Голубев

« 01 » 2021 г.

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

результатов диссертационной работы Афонина Кирилла Нильевича «Тепловой режим источника света на основе GaN/InGaN в светодиодных лампах»

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационной работы К.Н. Афонина на предприятии ООО «Руслед».

Результаты диссертационного исследования К.Н. Афонина в части исследования тепловых режимов светодиодных ламп со светодиодными модулями на основе GaN/InGaN используются в ООО «Руслед» при проектировании лампы светодиодной для общего освещения СА 230-9-1, предназначенной для прямой замены традиционных ламп накаливания и энергосберегающих компактных люминесцентных ламп (торговая марка LEADlight).

Использование результатов диссертационной работы позволяет обеспечить соответствие технических параметров и характеристик планируемой к производству продукции (Лампочка Томича) действующей нормативной документации к осветительным устройствам и электрическим лампам.

Начальник
конструкторско-технологического отдела

Кассирова Г.В. Кассирова
« 20 » 01 2021 г.



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновациям ФГБОУ ВО «ТУСУР»

А.Г. Лошилов

«21» 01 2021 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы «Тепловой режим источника света на основе GaN/InGaN в светодиодных лампах» на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
Афони́на Кирилла Ни́льевича

Настоящим акт составлен о том, что результаты диссертационной работы К.Н. Афони́на использовались в Научно-исследовательском институте светодиодных технологий ТУСУР при выполнении работ по целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» в рамках проектов:

– «Разработка энергосберегающей лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания». Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57714X0061;

– «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств». Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0266.

Результаты диссертационного исследования К.Н. Афони́на использованы при разработке конструкций экспериментальных образцов ламп светодиодных ЕГВА.433751.720, ЕГВА.433751.721, ЕГВА.433751.722, ЕГВА.433751.723.

Внедрение результатов работы К.Н. Афони́на позволило обеспечить тепловой режим экспериментальных образцов ламп светодиодных ЕГВА.433751.720, ЕГВА.433751.721, ЕГВА.433751.722, ЕГВА.433751.723.

Ответственный исполнитель

Доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.

В.С. Солдаткин

«21» 01 2021 г.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2723967

СВЕТОДИОДНЫЙ ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (RU)*

Авторы: *Давыдов Валерий Николаевич (RU), Туев Василий Иванович (RU), Афонин Кирилл Нильевич (RU), Давыдов Михаил Валерьевич (RU), Солдаткин Василий Сергеевич (RU), Вилисов Анатолий Александрович (RU)*

Заявка № 2019133066

Приоритет изобретения 16 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 18 июня 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 16 октября 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 188947

СВЕТОДИОДНАЯ ЛАМПА

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Афонин Кирилл Нильевич (RU), Вилисов Анатолий Александрович (RU), Солдаткин Василий Сергеевич (RU), Туев Василий Иванович (RU), Юлаева Юлия Витальевна (RU)*

Заявка № 2018119785

Приоритет полезной модели 23 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 30 апреля 2019 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 23 мая 2028 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 183304

СВЕТОДИОДНАЯ ЛЕНТА ДЛЯ ЛАМПЫ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Афонин Кирилл Нильевич (RU), Вилисов Анатолий Александрович (RU), Озеркин Денис Витальевич (RU), Ряполова Юлия Витальевна (RU), Солдаткин Василий Сергеевич (RU), Старосек Данил Геннадьевич (RU), Туев Василий Иванович (RU)*

Заявка № 2017146187

Приоритет полезной модели 27 декабря 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 17 сентября 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 27 декабря 2027 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 185874

СВЕТОДИОДНАЯ ЛАМПА

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Афонин Кирилл Нильевич (RU), Вилисов Анатолий Александрович (RU), Солдаткин Василий Сергеевич (RU), Туев Василий Иванович (RU), Юлаева Юлия Витальевна (RU)*

Заявка № 2018134842

Приоритет полезной модели 27 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 21 декабря 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 01 октября 2028 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 193054

СВЕТОДИОДНАЯ ЛЕНТА ДЛЯ ЛАМПЫ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Андреева Мария Владимировна (RU), Афонин Кирилл Нильевич (RU), Вилисов Анатолий Александрович (RU), Ганская Елизавета Сергеевна (RU), Солдаткин Василий Сергеевич (RU), Туев Василий Иванович (RU), Тепляков Константин Владимирович (RU)*

Заявка № 2019119283

Приоритет полезной модели 19 июня 2019 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 11 октября 2019 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 19 июня 2029 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 192891

СВЕТОДИОДНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Афонин Кирилл Нильевич (RU), Вилисов Анатолий Александрович (RU), Незнамова Елена Григорьевна (RU), Юлаева Юлия Витальевна (RU), Солдаткин Василий Сергеевич (RU), Туев Василий Иванович (RU), Хомяков Артем Юрьевич (RU)*

Заявка № 2019115062

Приоритет полезной модели 16 мая 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 04 октября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 16 мая 2029 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ильин

Приложение Б

(справочное)

Перечень средств измерений и испытательного оборудования

Наименование, тип и марка	Кол- во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Латр	1	TDGC2-0.5K (2A)	Диапазон напряжения: 0-250 В. Мощность: 0.50 кВт. Количество фаз – однофазный. Тип стабилизатора электрохимический.
Ваттметр универсальный	1	GPM-8212	Диапазон мощности: 0,32 мВт – 13,1 кВт $\pm(0,2\%)$; Диапазон переменного напряжения: 1 мВ – 640 В $\pm(0,1\%)$; Диапазон тока: 0,1 мА – 20,5 А $\pm(0,1\%)$.
Фотометрический шар	1	ФШ-1.0	Световой поток лм 7 – 3000 лм, погрешность измерений не более $\pm 10\%$
Гониофотометр	1	ГФ	Измерительная фотоголовка. Интегральная токовая чувствительность, нА/лк не менее 20; основная относительная погрешность не более $\pm 6 \%$; нелинейность чувствительности в диапазоне измерений, не более $\pm 1 \%$; погрешность коррекции $S_{0TH}(\lambda)$ ГФ относительно $V(\lambda)$ 1 класс; время непрерывной работы, час., не менее 8. Контрольно-измерительный блок с линейным приводом и угловыми

			датчиками лампы. Разрешающая способность датчика вертикальной платформы 14 двоичных разрядов, т.е. не хуже 1,5 угловых минуты. Абсолютная точность не хуже 2,5 минут. Разрешающая способность датчика угла поворота вокруг горизонтальной оси 15 угловых минут.
Спектроколориметр	1	ТКА-ВД	<p>Диапазоны измерения: освещенности, лк 10 – 20 000 яркости, кд/м² 10 – 20 000 цветовой температуры, К 1600 – 16 000 координат цветности $x = 0,004 - 0,734$; $y = 0,005-0,834$; $u' = 0,007-0,623$; $v' = 0,005-0,595$. Спектральный диапазон: 380-760 нм.</p> <p>Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений яркости и освещенности не более $\pm 10 \%$.</p> <p>Предел допустимого значения основной относительной погрешности измерения коррелированной цветовой температуры не более $\pm 10 \%$.</p>