

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»
(ТУСУР)

УДК 621.382.2

На правах рукописи



Старосек Данил Геннадьевич

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМОВ
В НИТЕВИДНЫХ МОДУЛЯХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ
GaN/InGaN ДИОДОВ**

Специальность 01.04.04 – «Физическая электроника»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Озёркин Денис Витальевич

Томск 2019

Содержание

Введение.....	4
1 Литературный обзор	10
1.1 Перспективные светоизлучающие приборы. Общая характеристика: типы устройств, особенности и их дальнейшее развитие	10
1.2 Полупроводниковые источники света	17
1.2.1 Принцип работы	17
1.2.2 Типовая конструкция.....	18
1.3 Развитие светодиодных технологий	19
1.4 Основные факторы, сдерживающие распространение полупроводниковых осветительных устройств	23
1.5 Влияние повышенных температур на полупроводниковые приборы	25
1.6 Методы исследования тепловых режимов СД.....	29
1.6.1 Расчёт температуры p-n перехода	29
1.6.2 Метод последовательного теплового сопротивления	32
1.7 Анализ общих принципов вычислительной гидрогазодинамики	35
1.8 Обзор методов расчёта тепловых режимов	39
1.8.1 Аналитический (теплофизический) метод	39
1.8.2 Графический (экспериментальный) метод	41
1.8.3 Метод поэтапного моделирования	42
1.8.4 Метод конечных разностей (МКР).....	43
1.8.5 Метод конечных элементов (МКЭ).....	44
2 Моделирование теплового режима	50
2.1 Светодиодная филаментная нить	50

2.7 Использование вычислительных методов моделирования тепловых режимов	73
3 Результаты и обсуждение полученных результатов	78
3.1 Результаты компьютерного моделирования зависимости температурного режима от количества ФСНМ.....	78
3.2 Результаты исследования зависимости теплового режима и светового потока ФСИС от газового наполнения колбы	82
3.3 Экспериментальное исследование зависимости температурного режима ФСНМ от толщины и материала основания	85
3.4 Результаты исследования зависимости температурного режима ФСНМ от толщины, конструкции и материала основания.....	89
3.5 Результаты экспериментальных исследований образцов, изготовленных с применением одномерной топологической термокомпенсации	93
Заключение	102
Список сокращений	104
Список литературы	105
Приложение А (справочное)	118
Приложение Б (справочное).....	119
Приложение В (справочное)	120
Приложение Г (справочное).....	121
Приложение Д (справочное)	122
Приложение Е (справочное).....	123
Приложение Ж (справочное)	124

Введение

Актуальность работы

В настоящее время наиболее перспективными источниками света (ИС) являются полупроводниковые (ПП) приборы на основе GaN/InGaN светодиодов (СД) благодаря ряду преимуществ: энергоэффективность ламп на основе СД порядка 120 лм/Вт, низкая потребляемая мощность от 4 до 18 Вт для точечных бытовых светильников и длительный срок службы. При условии соблюдения рекомендованных производителем электрических и тепловых режимов, срок службы устройств на основе СД может достигать 30 000 часов. Полупроводниковые ИС находят широкое применение во многих сферах человеческой деятельности и постепенно вытесняют традиционные светотехнические устройства, такие как лампы накаливания и газоразрядные осветительные приборы. Существует множество вариантов конструкции светодиодного ИС бытового назначения, подавляющее большинство которых состоит из цоколя, устройства вторичного электропитания, собственно светодиодов и массивного радиатора для их охлаждения.

Объект и предмет исследования

Применение филаментных светодиодных нитевидных модулей (ФСНМ) вместо, распространенных в настоящее время, корпусированных СД в традиционной стеклянной колбе и со стандартным цоколем E27 или E14, позволяет создать инновационную замену традиционным ЛН и компактным люминесцентным лампам (КЛЛ). Также источники света на ФСНМ обладают преимуществами по сравнению с традиционными светодиодными лампами. Такая конструкция позволяет объединить привычный дизайн бытового ИС на основе нити накаливания с многочисленными достоинствами полупроводниковых ИС.

Одной из центральных проблем в развитии полупроводниковых светоизлучающих приборов является проблема обеспечения оптимального температурного режима, необходимого для стабильного, эффективного и долговременного функционирования прибора. Конструкция лампы с ФСНМ позволяет реализовать теп-

лоотвод от ФСНМ с помощью естественной конвекции внутри герметичной колбы. Эффективность подобного способа теплоотвода существенно повышается при равномерном температурном профиле ФСНМ.

Создание необходимых температурных условий, необходимых для нормального функционирования прибора, во многом определяет энергоэффективность, надежность и, как следствие, потребительскую привлекательность устройства.

Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является стабилизация электрических и тепловых режимов филаментного светодиодного источника света (ФСИС) с конвекционным газовым охлаждением. Стабилизация достигается за счёт минимизации среднеквадратического отклонения рабочих температур кристаллов ФСНМ в конструкции ФСИС. Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Исследование электрических процессов и процессов переноса тепловой энергии в ФСНМ и ФСИС.
2. Обеспечение высокой температурной стабильности параметров филаментных светодиодных нитевидных модулей.
3. Разработка математической модели распределения плотности теплового потока для филаментных светодиодных нитевидных модулей.
4. Разработка и создание конструкции филаментных светодиодных нитевидных модулей с улучшенными показателями температурной стабильности.

Научная новизна

1. Проведено исследование электрических и тепловых характеристик, установлена зависимость электрических характеристик от тепловых условий.
2. Предложено понятие функции локализации кристаллов на подложке с целью минимизации среднеквадратического отклонения рабочих температур.

3. Предложено использование метода дихотомии для автоматизации размещения кристаллов светодиодов в соответствии с целевой функцией локализации. Таким образом, метод позволяет синтезировать новые термостабильные электронные приборы и устройства.

4. Предложен комплексный метод повышения температурной стабильности светоизлучающего прибора на основе филаментных светодиодных нитевидных модулей. Предложена конструкция ФСИС с улучшенным температурным режимом.

Практическая значимость работы

1. Разработаны конструктивно-технологические рекомендации для изготовления филаментных светодиодных источников света с конвекционным газовым охлаждением, применительно к производственным особенностям промышленного партнёра – общества с ограниченной ответственностью «Руслед».

2. Результаты научных исследований внедрены в учебный процесс в части реализации магистерской программы 27.04.04 «Управление в технических системах».

3. Создан макет филаментного светодиодного нитевидного модуля, максимальная температура поверхности которого составляет 110 °С в гелиевой атмосфере при величине прямого тока 10 мА.

4. Практическая значимость подтверждается выполнением этапов прикладных научных исследований и экспериментальных разработок «Разработка энергосберегающей светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания». Соглашение № 14.577.21.0061 от 5 июня 2014 г. и «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств». Соглашение № 14.577.21.0266 от 26 сентября 2017 г.

Методы исследования

Решение поставленных задач потребовало комплекса методов: математического и имитационного моделирования, численного метода решений уравнений в частных производных, в частности метод конечных элементов, метод граничных элементов и других, а также технологических методов, включая шариковую микросварку проволочных выводов светодиодных кристаллов и тепловизионную съёмку с высокой разрешающей способностью. Применялись программы для расчёта и моделирования MathCad 14, Autodesk Inventor 2016 и Autodesk Simulation CFD 2016, технологическое оборудование: системы микросварки клином и шариком iBond5000 Kulicke & Soffa, линия производства и испытаний светодиодных ламп ООО «Руслед», измерительное оборудование: тепловизор с высоким пространственным разрешением FLIR SC7000, прецизионный источник-измеритель Keithley 2410.

Научные положения, выносимые на защиту

1. В стационарном тепловом режиме, в филаментных светодиодных нитевидных модулях возникает градиент температуры вдоль длины основания, влияющий на величину напряжения и приводящий к нестабильности световых характеристик филаментных светодиодных нитевидных модулей.

2. Локализация светодиодных кристаллов с использованием метода дихотомии позволяет повысить равномерность температурного профиля по длине основания филаментного светодиодного нитевидного модуля, достичь равенства температур светодиодных кристаллов и снизить общую температуру конструкции филаментного светодиодного нитевидного модуля на 15 %.

3. Увеличение объёма подложки из никелированной стали за счёт заполнения пространства между рёбрами радиатора при одновременном уменьшении эффективной площади рассеяния на 20 % приводит к снижению общей температуры конструкции филаментного светодиодного нитевидного модуля на 9.3 %.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методов исследования, воспроизводимостью полученных результатов и их согласованностью с современными представлениями о физических процессах – распределении тепловой энергии в полупроводниковых приборах.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Научная сессия ТУСУР - 2015» (Россия, Томск, 2015), Всероссийской выставке «ВУЗПРОМЭКСПО 2015» (Россия, Москва, 2015), XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (Россия, Томск, 2016), XII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Россия, Томск, 2016), V Международной научно-технической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» (Россия, Томск, 2016), Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР - 2017” (Россия, Томск, 2017), Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР - 2018” (Россия, Томск, 2018), Международной IEEE–Сибирской конференции по управлению и связи SIBCON–2019 (Россия, Томск, 2019).

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 24 работах, из которых 2 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 4 работы индексируемые реферативными базами данных Web of Science и Scopus, 16 докладов на всероссийских и международных конференциях, 2 патента РФ.

Личный вклад автора

Представленная работа является результатом исследований, проводившихся 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». Автором лично сформулирована задача повышения равномерности профиля температурного поля вдоль оси основания (ОСН) филаментного светодиодного нитевидного модуля и предложен метод локализации кристаллов. Автор является исполнителем прикладных научных исследований и экспериментальных разработок «Разработка энергосберегающей лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания». Разработаны разделы отчета о прикладных научных исследованиях: Этап 1. П. 1.4 «Методы теплового анализа светодиодных ламп», П.2.2.2 «Расчет тепловых характеристик», Этап 2, Том 2. Р.5 «Расчеты, подтверждающие работоспособность и надёжность конструкции», Этап 3, П. 1.1 «Пояснительная записка к комплекту чертежей на макетные образцы светодиодной лампы»; Р. 2 «Разработка программ и методик испытаний макетных образцов филаментных светодиодных ламп и макетных образцов устройства питания», Этап 4, П. 1.2 «Описание и обоснование выбранной конструкции», Этап 5, П. 1 «Обобщение результатов исследований». При подготовке отчёта автор использовал результаты повышения квалификации Philips Lightning University «LED Professional program».

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Объём работы составляет 124 страницы машинописного текста, включая 53 рисунка, 52 формулы, 8 таблиц и списка литературы из 122 наименований.

1 Литературный обзор

С момента открытия высокоэффективного синего светоизлучающего диода прошло более двух десятков лет, и в настоящее время в сочетании с люминофорной композицией такой полупроводниковый ИС встречается повсеместно. Светодиодные ИС по праву занимают лидирующее место среди наиболее перспективных осветительных приборов. Широко известны многочисленные преимущества СД по сравнению с другими светоизлучающими приборами, такие как: высокая эффективность преобразования электрической энергии в световую, высокое быстродействие, малое потребление энергии, надёжность, длительный срок службы, высокая устойчивость к механическим и климатическим воздействиям. Более подробно с преимуществами СД можно ознакомиться в монографии Шуберта Ф. [1] и работе Когана Л. М. [2].

1.1 Перспективные светоизлучающие приборы. Общая характеристика: типы устройств, особенности и их дальнейшее развитие

В настоящее время известно три основных вида осветительных приборов, в статье Дадонова В.А. и Бондаря А.А. [3] используется удобное графическое представление классификации ИС, показанное на Рисунке 1.1. Основной тенденцией в развитии ИС является повышение эффективности. В таблице 1.1 представлены результаты, которые позволяют провести сравнительный анализ эффективности выпускаемых промышленностью ИС, проиллюстрированных Рисунком 1.2.

При этом можно различить как минимум пять методов генерации света: «тепловое свечение вещества, газовый разряд при различных давлениях, фотолюминесценция, электролюминесценция в ПП, плазменное излучение» [4]. Вкратце ознакомимся с каждым методом.

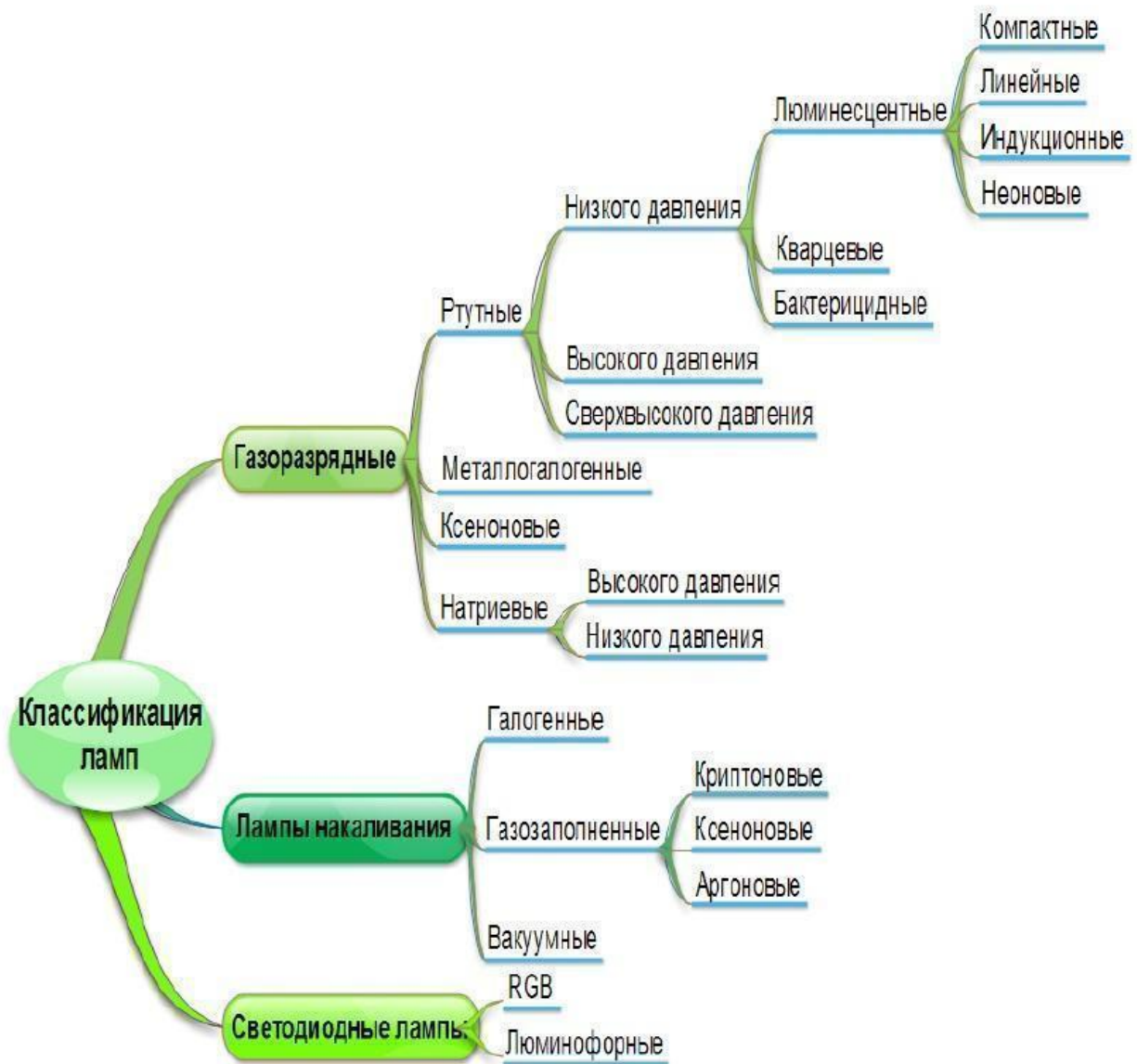


Рисунок 1.1– Классификация ИС

Термоизлучение. Повышение температуры проводника до экстремальных значений за счёт протекания электрического тока. Самым популярным материалом проводника стал вольфрам, благодаря максимальной температуре плавления (3683 К).

Газовый разряд. В стеклянный сосуд закачивается благородный газ с добавлением паров металлов, а также редкоземельных элементов. Подача напряжения провоцирует дуговой разряд. В зависимости от газа, можно получить различные длины волн излучения.

Люминесцентный процесс. По аналогии с газовым разрядом происходит генерация излучения в УФ диапазоне. Свет падает на люминофорную композицию, которая находится на внутренних стенках стеклянной колбы, и изменяет длину волны, переходя в видимый диапазон. Люминесцентный процесс применяется в люминесцентных лампах, КЛЛ, а также СД по схеме “синий кристалл-люминофорное покрытие” [5–6].

Излучательная рекомбинация. При подведении прямого напряжения к гетероструктуре в области $p - n$ -перехода величина потенциального барьера уменьшается, электроны из p -области устремляются в n -область, а дырки – из p -области – в n -область. Прибывшие электроны и дырки образуют пары – рекомбинируют, при этом отдают потенциальную энергию квантам света $h\nu$, это и есть излучательная рекомбинация. Посредством дефектов или примесей они(электроны и дырки) в процессе рекомбинации преобразуют свою энергию в тепло безызлучательная рекомбинация [7].

Плазменное или СВЧ-разрядное излучение. В условиях высокочастотного электромагнитного поля и необходимого температурного уровня высокоионизированный аргон переходит в состояние плазмы и генерирует свет. Колба-излучатель находится внутри микроволнового резонатора, специальная мелкоячеистая структура которого свободно пропускает свет и препятствует проникновению СВЧ-излучения за пределы осветительного прибора [8]. Приборы на этом эффекте именуется PLS-лампами. Излучатель плазменного светильника выполнен в виде небольшой стеклянной колбы, внутри которой находится газ аргон и сера. Для создания нужных световых оттенков дополнительно могут использоваться другие вещества [9].

Все виды ИС можно проранжировать по основным характеристикам: световой выход, спектральные параметры (цветопередача, длина волны), электрические параметры (например, напряжение, значение потребляемого тока), конструктив-

ные параметры (габаритные размеры, форма), продолжительность безотказной работы, а также экономические (такие, как стоимость). В таблице 1.1 можно оценить различные типы ИС по вышеописанным параметрам.

Таблица 1.1 - Характеристики ИС

Источник света	Маркировка	Светоотдача, лм/Вт	КПД, %	Индекс цветопередачи	Срок службы, тыс. ч
Лампа накаливания	ЛН	15	3	97	1
Галогеновая лампа накаливания	ГЛ	22	4	98	3
Ртутная лампа высокого давления	ДРЛ	50	7	50	10
Люминесцентная линейная лампа	ЛБ	90	12	85	15
Компактная люминесцентная лампа	КЛЛ	60	8	80	12
Натриевая лампа	ДНаТ	120	22	39	20
Металлогалогенная лампа	ДРИ	85	14	90	10
Ксеноновая лампа	КсЛ	50	6	70	3
СВЧ-лампа	PLS	120	85	80	25
СД лампа	LED	160	22	85	30-40

Стоит отметить сравнительно новые плазменные ИС, они обладают высокими тактико-техническими показателями. СВЧ-разрядные осветительные приборы являются единственными лампами, которые излучают практически во всем диапазоне длин волн видимого излучения, обладают высоким уровнем светоотда-

чи, самым высоким уровнем КПД, а также, по утверждению А.А. Гавриленко и Я.А. Кунгса [10], не включают в состав вредных веществ. Тем не менее в настоящее время данные светильники обладают весьма сложной конструкцией и схемой питания, и, как следствие, высокой стоимостью, а также рядом недостатков, описанных на интернет-площадке Аксиома света [11].

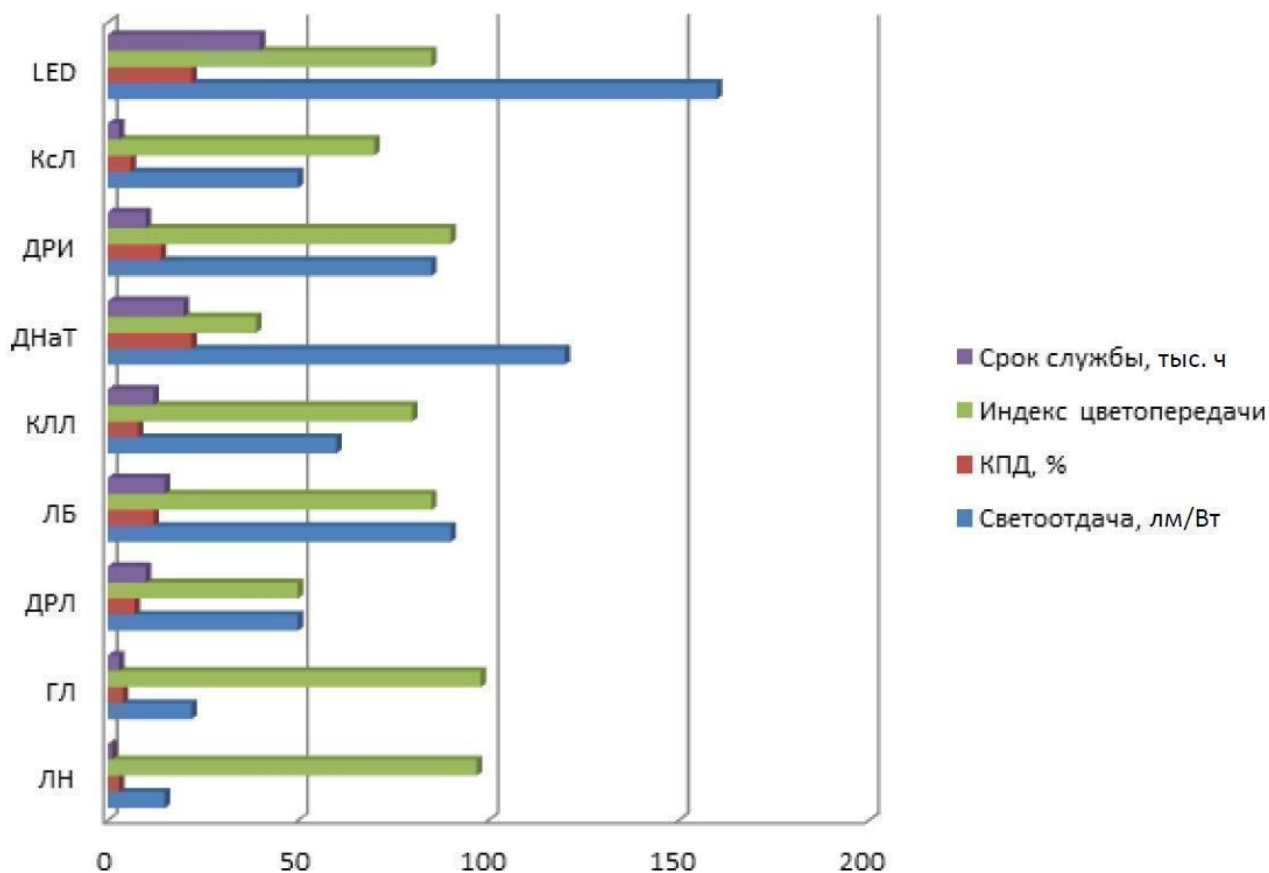


Рисунок 1.2 – Основные показатели ИС

Анализируя представленные результаты, можно сделать следующий вывод: ИС на основе СД значительно превосходят конкурентов по большинству рассмотренных параметров. Помимо представленных основных параметров, ИС на основе СД обладают следующими достоинствами:

- высокая энергоэффективность – более чем в 10 раз выше КПД, чем у ЛН;
- высокая механическая прочность;
- вариативность и монохроматичность цветов;

- регулируемый световой поток;
- низкое напряжение питания;
- безвредность по отношению к окружающей среде;
- не содержит токсичных веществ;
- отсутствие ультрафиолетового и инфракрасного излучения;
- направленность (излучение света только в нужном направлении).

Технологии, связанные с разработкой и производством СД ИС, признаны наиболее перспективными технологиями в сфере освещения в XXI веке. Авторитетные мировые аналитические агентства, такие как McKensey&Company [12], делают прогнозы, согласно которым отрасль рынка СД освещения в грядущие три года покажет тенденцию развития со среднегодовыми темпами прироста в 40%.

В отчете подчеркивается уверенный рост применения СД освещения по всему миру. К 2020-му году, согласно прогнозу аналитиков, мировой рынок освещения может достигнуть объёма примерно 110 миллиардов евро (\$ 159 млрд.), при этом до 80% будет приходиться на СД освещение. Более наглядно динамика развития рынка представлена на Рисунке 1.3.

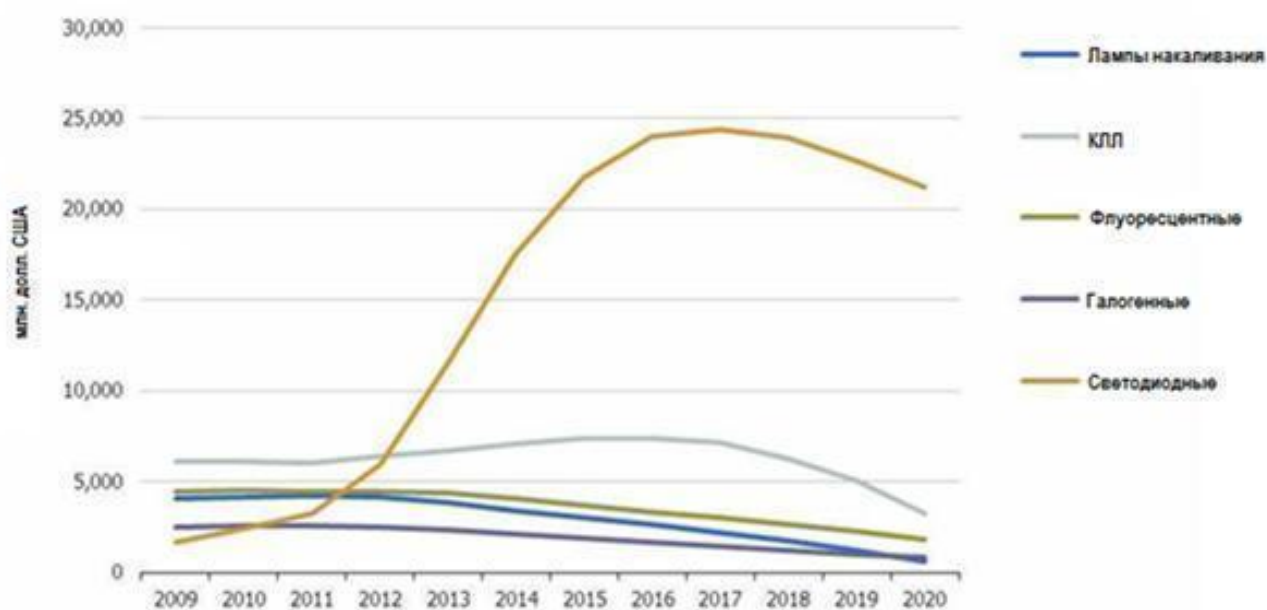


Рисунок 1.3 – Мировой рынок освещения в 2009-2020 гг., млн. долл.

Предметом исследований являются: общее освещение, автомобильные осветительные системы и архитектурное освещение. Эти сферы являются на сегодняшний день крупнейшими секторами глобального рынка освещения. На общее освещение (с дроблением на множество сегментов, из которых бытовая является самым крупным) приходилось около 75% от общего объема рынка освещения в 2010 году. В дальнейшем предполагается замедление среднегодовых темпов прироста до 13% в период с 2016 по 2020 год. Светодиодное освещение составит почти 65 евро млрд. (\$ 94 млрд.) к 2020 году, или около 60% от общего объема рынка освещения. «Существенные различия светодиодной технологии освещения по сравнению с другими технологиями приведут к фундаментальным изменениям в светотехнической промышленности по всей цепочке создания стоимости», - делают вывод аналитики. Подходы к стандартной реализации освещения в современном мире подлежат полному пересмотру благодаря новым возможностям светодиодов, например: гибкому дизайну, экологичности или возможности динамического изменения цветовой температуры света. Высокая степень управляемости светильников на основе СД ИС позволяет создавать интеллектуальные системы освещения. Аналитики Государственной информационной системы в области энергосбережения и повышения энергетической активности [13] допускают, что доходы от подобных решений достигнут 7 миллиардов евро в 2020-м году.

При повышении эффективности СД ИС можно значительно снизить расходы на электроэнергию, так как 60–70% подобных затрат в зданиях административного назначения отводится именно на освещение. На текущих этапах развития светотехнических устройств светодиодные ИС являются наиболее энергоэффективными и перспективными в сравнении с другими осветительными приборами. Согласно прогнозам, уже в ближайшие 10 лет именно этот сегмент рынка светотехники будет занимать основную долю.

1.2 Полупроводниковые источники света

1.2.1 Принцип работы

Светоизлучающий диод – полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, генерирующий излучение оптического диапазона в момент пропускания электрического тока. При прохождении через диод напряжения в прямом направлении из *n*-области электроны инжектируются в *p*-область, где они рекомбинируют с дырками. На Рисунке 1.4, предложенном ресурсом led-lamp.ru [14], приведена иллюстрация принципа работы светоизлучающего диода. Во время протекания этого процесса выделяется энергия в виде излучения кванта света определенной длины волны. При этом не все электроны рекомбинируют, и не все произведенные фотоны оказываются вне СК. Также значительная доля электрического тока преобразуется в тепловую энергию. Общая эффективность светоизлучающего диода определяется как отношение числа испущенных фотонов к общему числу инжектированных носителей заряда [15-16].

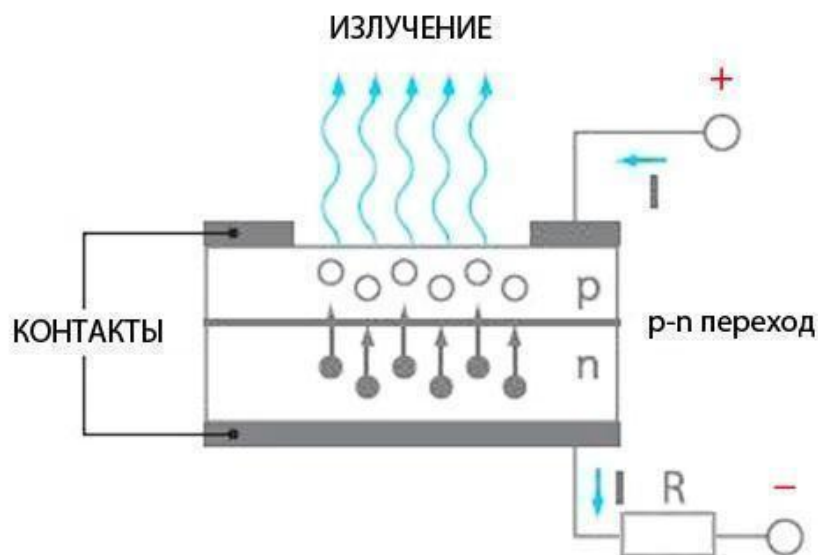


Рисунок 1.4 – Принцип работы светодиода

Спектральные параметры испускаемого излучения светодиода зависят от таких параметров, как: химический состав, используемых в нем полупроводниковых материалов, и технологический процесс изготовления. По утверждению М.Л. Бадгутлинова и его коллег [17], изменения длин волн излучения достигаются путём применения разных типов полупроводниковых материалов и легирующих примесей. К примеру, для получения голубого цвета свечения длиной волны от 450 до 570 нм могут быть использованы Индия-галлия нитрид (InGaN), Селенид цинка (ZnSe), Карбид кремния (SiC) в качестве субстрата Кремний (Si), для инфракрасного цвета с длиной волны более 760 нм применяют Арсенид галлия (GaAs), Алюминия галлия арсенид (AlGaAs).

1.2.2 Типовая конструкция

Светоизлучающий диод представляет собой конструкцию, состоящую из нескольких слоев разных полупроводниковых материалов, сформированных на одном ОСН с помощью методов, которыми располагает современная микроэлектроника. Пример конструкции приведен на Рисунке 1.5. Технологический процесс изготовления включает многочисленные этапы, при этом можно отметить основные: подготовка ОСН, формирование полупроводниковых слоев (эпитаксия), внедрение примесей (легирование), покрытие изоляционными слоями (оксидирование) и изготовление электродов (металлизация). В финале технологического цикла производства полупроводниковые ИС проходят испытания, подложка делится на отдельные кристаллы, которые затем проходят корпусировку. Светодиоды для освещения производятся в корпусах, как мультикристалльные сборки (матриц), а также создаются в бескорпусном исполнении (технология известна как Chip On Board, COB) [18].

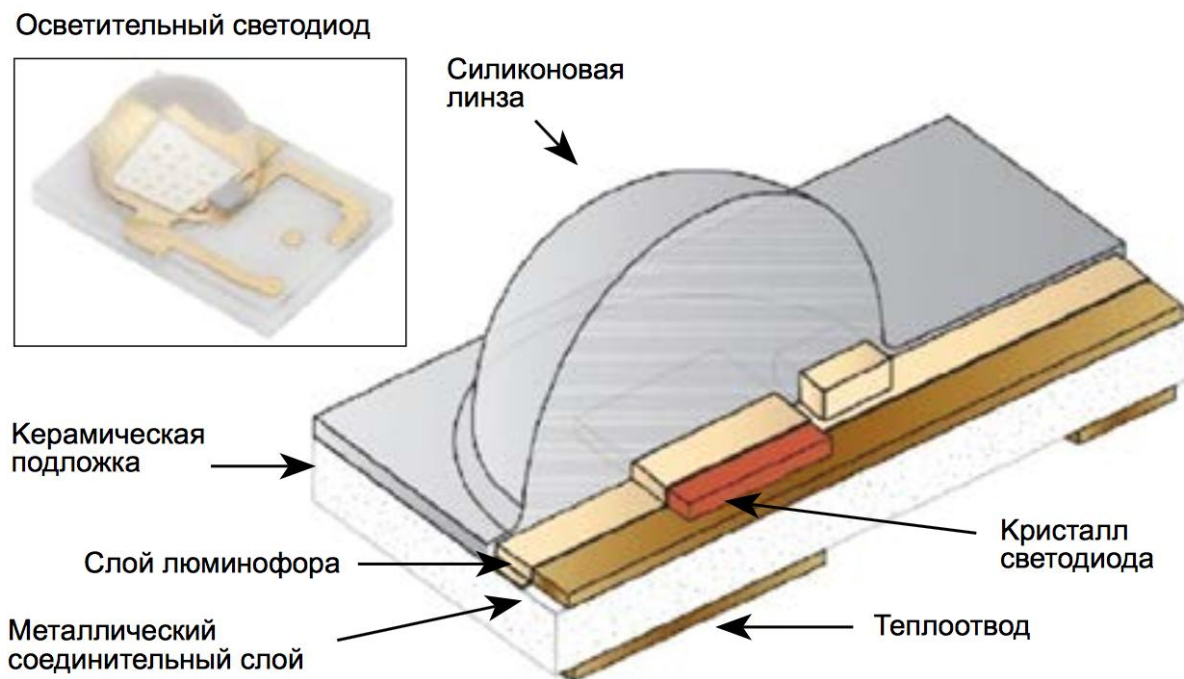


Рисунок 1.5 – Конструкция осветительного светодиода [19]

1.3 Развитие светодиодных технологий

В настоящее время становится всё более популярной тематика применения перспективных энергоэффективных технологий. По сообщениям представителей компании Нитрон [20], СД ИС являются одними из наиболее перспективных светоизлучающих приборов. Ко всему прочему, СД обладают широким спектром возможного использования (дисплеи и мониторы, автомобильный свет, промышленное и бытовое освещение, рекламные сооружения и пр.), наиболее динамичное развитие приходится на направление, связанное с использованием осветительных светодиодов.

Динамику в области СД технологий можно проследить по развитию мирового рынка СД осветительных приборов. Рост данного сегмента наблюдается как при общем росте реализации светотехнических устройств, так и на фоне позитивной тенденции рынка в области СД решений. Необходимо отметить, что повышение темпов реализации СД для промышленного и бытового освещения (54% в

2007-2008 гг.) превышают аналогичные показатели для всего рынка светотехники (5,2 %) и глобального рынка СД (11%). Общий объем глобального рынка СД освещения уже в 2008-м году составил \$1,4 млрд., при предсказанном росте до \$5 млрд. [21], а в 2013-м году вырос до 14,4 млрд. долл.[22], т.е. за 4 года рынок увеличился в 10 раз. Такая ситуация на рынке благотворно сказалась на применении новых технологических решений в производстве и проведении новых исследований во всем мире.

Ещё одним весьма наглядным индикатором прогресса в области полупроводниковых ИС является снижение затрат на производство. На Рисунке 1.6 можно отследить, как изменялись затраты на производство СД приборов на примере ламп «Retrofit LED» по данным тайваньской компании TSMC - Taiwan Semiconductor Manufacturing Co) [23].

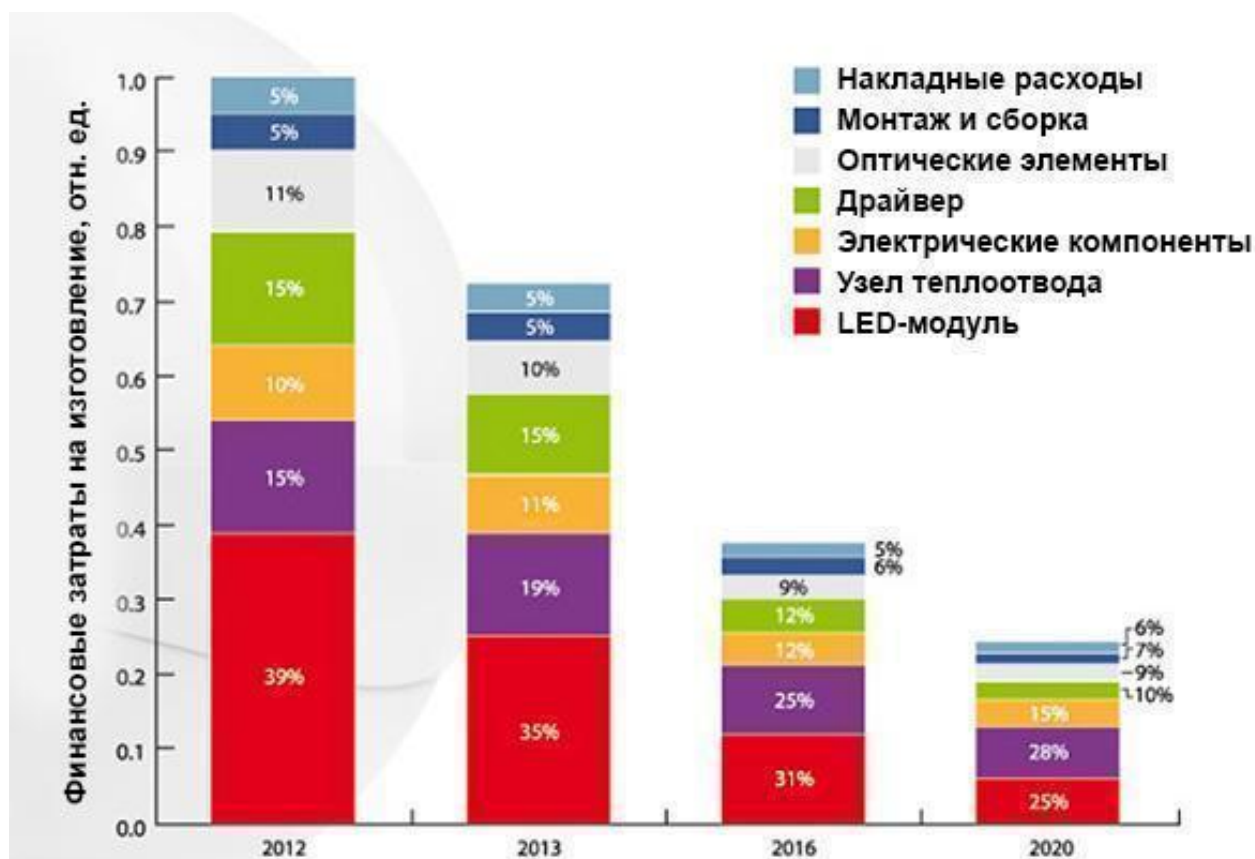


Рисунок 1.6 – Изменение процентного соотношения основных статей затрат на изготовление СД ламп

Развитие технологий освещения имеет такие тренды, как объединение производства (обусловлено понижением затрат на товары, и, как следствие, прибыли), интеллектуализация продукции, повышение продаж осветительных приборов высокой и средней мощности, интенсивное развитие в области разработки ИП для СД устройств, использование нанотехнологий и квантовых точек [24]. Также в настоящее время ученые работают над внедрением инновационных решений приведенных ниже.

GaN-светодиоды на кремниевых подложках. Данная технология изготовления СК, обеспечивающая высокую светоотдачу, и, как следствие, высокий показатель яркости и эффективности преобразования электрической энергии в световую. Изначально в производстве СД использовались достаточно дорогостоящие сапфировые ОСН. В дальнейшем их сменили более дешевые кремниевые ОСН, которые доступнее сапфировых на 30%. Однако рентабельность в условиях массового производства до сих пор окончательно не утверждена в силу того, что приборы на кремниевых подложках требуют дорогостоящие системы питания и оптику. Следовательно, стоимость готового продукта снижается незначительно [25]. Исследованиями в области технологий GaN-светодиодов с подложками диаметром 100 и 150 мм в настоящее время проводят компании BridgeLux, Toshiba, LatticePower, Plessey, Aledia, Azzurro Semiconductors и ARC Energy.

GaN-светодиоды на GaN-подложках. Ещё одна стремительно развивающаяся современная технология производства светодиодов, выгодно отличающаяся от технологии изготовления на кремниевых подложках. Изготовленные по этой технологии светодиоды, имеют более высокий индекс цветопередачи и обладают повышенной интенсивностью светового потока (у GaN-на-GaN изделий выше в 5–10 раз, чем у СД GaN-на-Si и GaN-на-SiC) [26]. Эту технологию активно развивает компания Sogaа. Согласно мнению представителей этого предприятия, использование «родного» GaN-основания позволит упростить процесс производства светодиодов и понизить себестоимость готовых устройств.

Конструкция лампы с массивом СК. Отдельно стоит отметить подход таких крупных производителей как *Philips* и *NliteN*, которые работают над технологией СД ламп, под названием *SlimStyle*. Стоимость этого осветительного прибора планируется закрепить на уровне 10 долларов. Отличительной особенностью является тонкая и легкая конструкция, и сравнительно невысокие затраты на производство. Главная инновация этого устройства – дискообразный теплоотвод, на котором располагаются до 26 СК. Световой поток такой лампы – 800 лм при мощности – 10,5 Вт.

На переменном токе. Одним из приоритетных направлений является работы, связанные с ИП СД приборов. В современных осветительных лампах наименее надёжным звеном зачастую становится ИП. В связи с этим прорабатываются новые подходы и технические решения, как, например, ИП по переменному току. К преимуществам можно отнести простоту конструкции, возможность повысить мощность светодиодов, а также снижение нелинейных искажений. Исследования проводят Lynk Labs (серия Tesla) и Seoul Semiconductor (серия Acriche) [27]. Помимо отдельных ИП, на переменном токе существуют непосредственно светодиоды, питающиеся переменным током, так называемые AC-LED. Такой светодиод может работать непосредственно от ИП переменного тока или от понижающего трансформатора, при этом в некоторых случаях может потребоваться только корпус и балластный резистор. С другой стороны, для работы AC-LED может быть необходимость в оптимизации управления питанием (коррекция коэффициента мощности и суммарного коэффициента гармонических искажений) [28].

Возможность изменять цвет. В настоящее время появилась тенденция к адаптации освещения жилых помещений к особенностям человеческого организма, так появились осветительные приборы с изменяемым цветом свечения. Подстройка цвета позволяет организовать освещение, оказывающее благотворное влияние на самочувствие человека, в том числе и на биоритмы, от которых (как заявляют исследователи в рамках проекта «Освещение, ориентированное на человека») в некоторой степени зависит вероятность развития ожирения, диабета и

онкологических заболеваний [29]. Данная программа получила большое распространение в странах Северной Америки и Европы [30]. Программа направлена на возможность повышения настроения, улучшение концентрации и работоспособности, улучшения режима сна и бодрствования.

Филаментные светодиодные лампы. Новый виток развития СД технологий запустили лампы, которые выглядят практически также как и лампы накаливания, за исключением того, что нить накаливания заменена на ФСНМ [31]. Лампа, сконструированная на ФСНМ, соответствует всем современным требованиям, обладает высокой эффективностью. К примеру, ФСИС мощностью 4-8 Ватт эквивалентна энергосберегающей, компактной люминесцентной лампе (КЛЛ) 9-20 Ватт, или 75-ваттной лампе накаливания. Конструкция прибора эстетична и обладает высокой эргономичностью. ИП имеет малые габариты и располагается внутри цоколя, а колба имеет лаконичную традиционную форму [32].

1.4 Основные факторы, сдерживающие распространение полупроводниковых осветительных устройств

Преимущества технологий твердотельного освещения в настоящее время практически ни у кого не вызывают сомнений, тем не менее на протяжении уже нескольких десятилетий полупроводниковые ИС до сих пор не завоевали доминирующей позиции в системах освещения. Светодиоды можно увидеть в самых разных областях применения, но выделить область, где в подавляющем большинстве используются только СД, достаточно сложно. Основным сдерживающим фактором принято считать высокую стоимость СД осветительных приборов по сравнению с компактными люминесцентными лампами (КЛЛ), лампами накаливания (ЛН) и др. Однако производители СД постоянно ведут разработки, оптимизируют технологический процесс и неуклонно снижают себестоимость готовых устройств, благодаря чему доступность СД ламп постепенно выходит на уровень КЛЛ. Тем не менее желаемого распространения светодиоды всё еще не получили.

Производители довольно часто заявляют весьма завышенный срок службы СД ламп, при этом не предоставляют достоверных результатов испытаний своей продукции. Подобные случаи далеко не единичны, что наносит непоправимый урон репутации СД, как наиболее перспективного ИС. Срок службы, который указывается для СД ламп, нередко отождествляется со сроком службы самого СК, что, конечно же, является заблуждением. Светодиодный осветительный прибор - сравнительно сложное устройство, которое обычно включает в свой состав проводочные соединения СК с токовводами, люминофорное покрытие [33], теплоотводящие элементы, а также ИП, состоящий из множества электронных компонентов и их соединений. Из этого следует сделать вывод, что при оценке надёжности светодиодного прибора необходимо применять комплексный подход, учитывающий надёжность каждого отдельного элемента системы и всего устройства в целом.

Возникает конфликтная ситуация, которая определяет современное развитие технологий твердотельного освещения: необходимо снизить стоимость конечного продукта при этом поддерживая заявленные характеристики. Поддерживая надёжность СД лампы, необходимо использовать качественные ИП, которые, помимо срока службы, влияют на такие важные параметры, как коэффициент пульсаций, светоотдачу, уровень электромагнитной совместимости, массогабаритные показатели. В настоящей работе предложен оригинальный способ решения проблемы ИП, позволяющий максимально упростить его устройство.

Неразрывно связана проблема надёжности с обеспечением заданного производителем температурного режима СК. Одним из главных параметров любого осветительного прибора является его световой поток и эффективность преобразования электрической энергии в световую. Некоторые недобросовестные производители преднамеренно завышают уровень прямого тока через СД, не обеспечив должный теплоотвод. Таким образом, осветительный прибор имеет высокий световой поток на протяжении, не превышающем четверти заявленного срока служ-

бы, и яркость довольно резко падает [34]. Также значительно возрастают риски выхода из строя из-за возникновения других отказов.

Важным параметром для осветительного устройства также считается распространение излучения в пространстве. Определяется этот параметр как кривая силы света КСС. Довольно часто для СД ламп она представляет собой неравномерную полусферу с заметными затемненными областями.

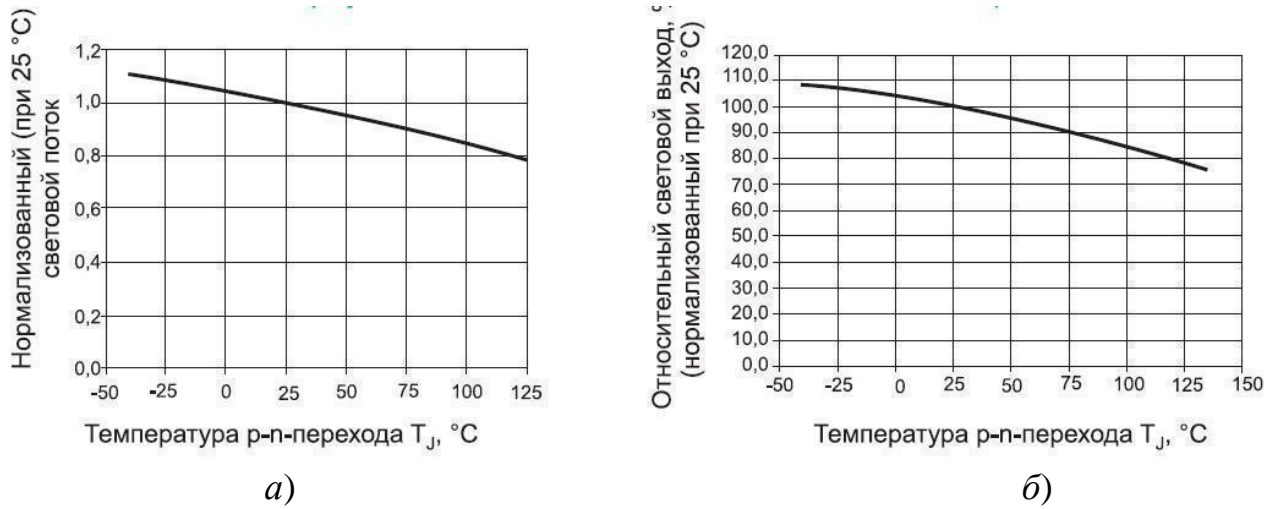
Точечная яркость - также актуальная проблема твердотельных технологий. Активная область СК должна быть минимальной, чтобы достичь требуемых параметров при меньших значениях тока[35].

Возможным решением вышеописанных проблем может стать такой светодиодный прибор, который обеспечивает максимальный теплоотвод от СК, позволяя проводить большой ток, при этом напряжение не пришлось бы значительно понижать относительно первичного ИП.

1.5 Влияние повышенных температур на полупроводниковые приборы

Известно, что ОСН, выполненное из сапфира, имеет «довольно низкий коэффициент теплопроводности $\lambda = 27 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$, из-за чего в стационарном тепловом режиме (ТР) появляется температурный градиент» ([37]) вдоль главной оси ФСНМ. Таким образом, из-за градиента температур возникает эффект установления разных значений рабочих температур СК, коррелирующий с линейными координатами.

Вышеописанный эффект, вызывающий разницу рабочих температур СК, напрямую влияет на световой выход $\Delta\eta$. Экспериментально доказано [36]: при значении температуры *p-n*-перехода СК законченного прибора (70...100 °С) световой выход находится в пределах 85–90% от значений при температуре 25 °С (Рисунок 1.7).



а) нормализованный световой поток; б) относительный световой выход.

Рисунок 1.7 – Влияние температуры СК на световой поток

Одним из важнейших требований, предъявляемых при промышленном изготовлении СД, является сохраняемость характеристик. В настоящее время даже на самом высокотехнологичном оборудовании не представляется возможным производство СК с идентичными функциональными характеристиками. СД из одной производственной партии могут значительно различаться своими основными параметрами: длиной волны и коррелированной цветовой температурой (КЦТ). С целью объединения СД в группы по длине волны и КЦТ применяют биновку, проведя которую каждому СД присваивается собственный цветовой бин. При этом, в случае установки градиента рабочих температурах СК, заводская биновка СД теряет актуальность, так как процесс биновки производится в идентичных для каждого кристалла условиях - температура p - n -перехода составляет 25 °С.

При повышении температуры СК, как показано на Рисунке 1.8, КЦТ ТС увеличивается. Перегрев СК и смещение спектра излучаемого света в область синего, в сумме с общим ослаблением светового потока, дают эффект значительного снижения яркости СД [38].

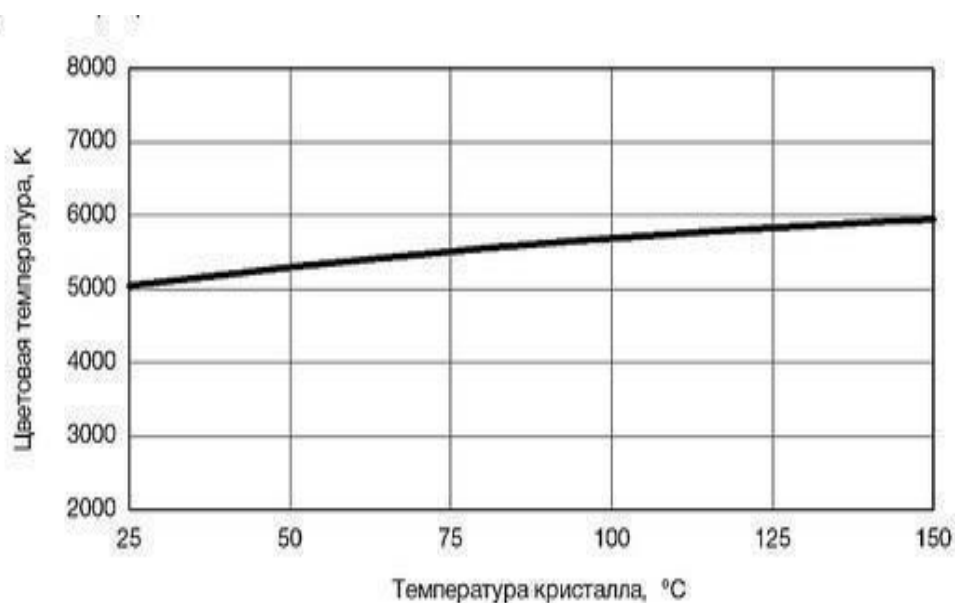


Рисунок 1.8 – Рисунок 1.8 – Влияние температуры СК
холодного белого света на КЦТ

Таким образом, встаёт вопрос о необходимости обеспечения высокого уровня стабильности характеристик ФСНМ – светового выхода $\Delta\eta$ и цветовой температуры ΔT_C в условиях градиента температур вдоль главной оси ФСНМФСНМ.

Под воздействием повышенных температур меняются почти все основные свойства СД устройств, которые производители указывают в технической документации, в основном, в условиях комнатной температуры. При этом приборы на таких светодиодах обычно функционируют в достаточно широком диапазоне температур.

Все основные причины образования проблемы негативного воздействия повышенных температур на свойства СД приборов в немного неравных долях можно разделить на две части – внутренние факторы и внешние, которые изменяют тепловые режимы работы светоизлучающего диода. Функционирование излучающего СК напрямую связано с протеканием электрического тока через *p-n*-переход диода и рекомбинацией носителей заряда. Каков бы высок ни был КПД светодиодного ИС [42], обеспечить функционирование светодиода, исключая вы-

деление тепловой энергии, не представляется возможным. К тому же в современных СД устройствах большая часть электроэнергии преобразуется в тепловую. Таким образом, какими бы ни были внешние условия, всегда имеется влияние внутреннего нагрева светодиодного прибора. Также внутренний разогрев складывается с условиями окружающей среды и имеет прямую зависимость от подведенной электрической мощности. В результате представляется весьма сложная тепловая характеристика работы СД, которая учитывает и сочетает все вышеописанные условия.

Основным элементом светодиода является запрещенная зона, сформированная в *p-n*-переходе СК, в которой происходит излучательная рекомбинация носителей зарядов, подробно рассмотренная в работе С. Никифорова [43]. Являясь энергетическим барьером для носителей заряда, который им необходимо преодолеть, для рекомбинации с зарядом противоположной полярности, запрещенная зона и её параметры определяют характеристики рекомбинации и, как следствие, определяют результат рекомбинации — оптическое и тепловое излучения. Из этого следует, что наибольший вклад в изменение спектрального состава оптического излучения светодиода вносит температурная зависимость ширины запрещенной зоны *p-n*-перехода гетероструктуры.

Повышенная температура в процессе эксплуатации полупроводникового прибора также оказывает влияние на другие составляющие устройства. Процессы негативного воздействия на твердотельные ИС подробно описаны в работе [44]. Рассмотрены такие процессы как: деградация активной области СК, деградация электродов, тепловая деградация, термическая усталость и короткое замыкание. Так или иначе, большинство отказов связано с неправильным температурным режимом работы полупроводникового прибора.

1.6 Методы исследования тепловых режимов СД

1.6.1 Расчёт температуры p-n перехода

Одним из основных методов расчёта теплового режима светодиодного прибора является расчёт температуры *p-n* перехода. Для определения температуры перехода T_j используется уравнение:

$$T_j = R_{thJ} \times P + T_{ref} \quad (1.1)$$

где R_{thJ} – тепловое сопротивление переход-контрольная точка на поверхности корпуса СД, определяемое изготовителем;

P – рассеиваемая СД мощность;

T_{ref} – исходная температура, например, температура окружающей среды либо температура в контрольной точке.

После того, как была рассчитана температура *p-n* перехода T_j , её обычно сравнивают с температурой, определенной в техническом описании СД [45].

Если значение T_j выше определенной производителем температуры, возникает необходимость доработки устройства на основе данного СД прибора.

По стандарту EIA/JEDEC JESD51.1 значение теплового сопротивления определяется уравнением:

$$R_{thJ} - X = (T_j - T_x) / P_h \quad (1.2)$$

где T_x – температура контрольной точки X ;

P_h – мощность.

Уравнение (1.2) подразумевает пространственную модель разности температур в условиях теплового баланса: разогрев перехода, определение температуры перехода и температуры в контрольной точке X . Когда величина контрольной температуры равна температуре окружающей среды (которая контролируется во время измерений, к примеру, радиатором) до начала нагрева в состоянии теплово-

го равновесия $T_{j0} = T_x$, то исходная температура перехода и температура контрольной точки равны.

По окончании разогрева устанавливается состояние теплового равновесия и фиксируется температура p - n перехода. Такой процесс измерений называется методом статического испытания и позволяет записать уравнение (1.1) в ином виде. Допустим, что в исходном состоянии к СД приложена определенная тепловая мощность P_{H1} , а в конечном состоянии – P_{H2} . В такой ситуации температура p - n перехода для каждого состояния определяется выражениями:

$$T_{J1} = R_{thJ-X} \cdot P_{H1} + T_x, \quad (1.3a)$$

$$T_{J2} = R_{thJ-X} \cdot P_{H2} + T_x. \quad (1.3б)$$

Разность (1.3a), из (1.3б) даёт:

$$T_{J2} - T_{J1} = R_{thJ-X} \cdot (P_{H2} - P_{H1}). \quad (1.4)$$

Необходимо отметить, что температуры перехода из уравнения (1.4) T_{J1} и T_{J2} определены в разные промежутки времени $T_{J1} = T_J(t_1)$ и $T_{J2} = T_J(t_2)$. Подставляя эти выражения в (1.4) и преобразуя его, получим:

$$R_{thJ-X} = [T_J(t_2) - T_J(t_1)] / (P_{H2} - P_{H1})$$

или

$$R_{thJ-X} = \Delta T_J(t) / \Delta P_H, \quad (1.5)$$

где $\Delta T_J(t) = T_J(t_2) - T_J(t_1) = T_{J2} - T_{J1}$, а $\Delta P_H = P_{H2} - P_{H1}$.

Другими словами, вид уравнения (1.5) указывает на то, что вместо пространственной разности температур вдоль оси «переход-точка X», может использоваться тепловое сопротивление, которое, в свою очередь, можно посчитать, как разность исходной и конечной стационарных температур p - n перехода и соответствующим изменением величины тепловой мощности на переходе, проиллюстрированным Рисунком 1.9.

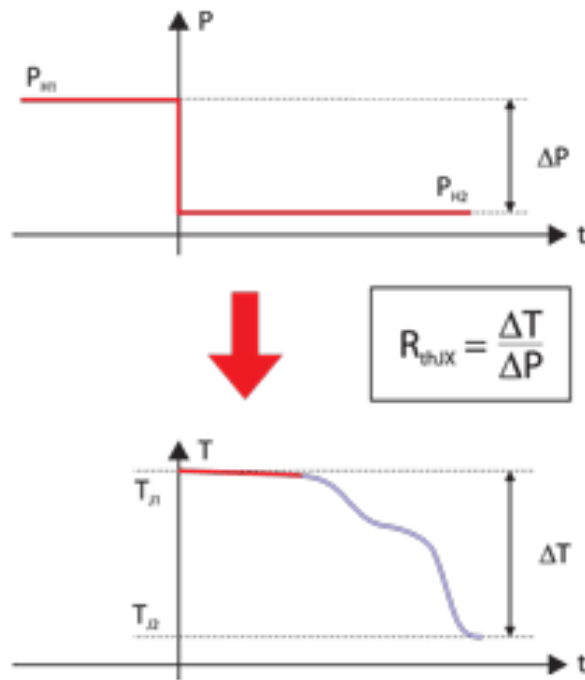


Рисунок 1.9 – Тепловое сопротивление переход – точка X

Исходя из вышеописанного, можно сделать вывод, что вместо разности температур в двух разных точках (пространственная разность), используется только временная разница температуры p - n перехода [46]. Основным преимуществом метода разностей, описываемого уравнением (6), является сведение к нулю погрешности в измерении температуры перехода. В случае с СД высокой мощности такой подход позволяет значительно упростить расчет.

Примечательно, что температуру перехода и значение теплового сопротивления переход – точка X проектировщики СД осветительных систем и производители светодиодов используют по-разному. Завод-изготовитель старается достичь лучших тепловых характеристик СД и отметить показатели, предоставляющие право сравнивать его продукцию с приборами конкурентов. Довольно часто основным показателем является тепловое сопротивление. Этот параметр зачастую указывается как единственная тепловая характеристика для проектировщика осветительной системы, по которой прогнозируется температура p - n перехода. В свою очередь, по этой температуре рассчитываются многие другие основные параметры светодиодного прибора. В связи с тем, что работа светодиодного устрой-

ства описывается весьма сложными физическими процессами, для прогнозирования поведения таких приборов требуется комплексный подход, учитывающий тепловые, электрические и оптические параметры. Пример комплексной электро-тепловой модели светоизлучающего диода приведен в [47].

1.6.2 Метод последовательного теплового сопротивления

Как было указано в предыдущем пункте, основным параметром, характеризующем тепловое поведение светодиода, является тепловое сопротивление. Для определения теплового режима устройства используется метод последовательного теплового сопротивления, представленный на Рисунке 1.10.



$$R_{j-a} = R_{j-s} + R_{s-s} + R_{b-a}$$

Где

R_{j-s} – тепловое сопротивление кристалла, эпоксидного клея и теплоотводящего основания,

R_{s-s} – тепловое сопротивление клея и алюминиевой пластины для распределения тепла,

R_{b-a} – тепловое сопротивление клея между радиатором и алюминиевой пластиной для распределения тепла.

Рисунок 1.10 – Пример расчета последовательного теплового сопротивления

Основой метода последовательного сопротивления являются следующие допущения: тепловая энергия, сгенерированная в *p-n* переходе, передаётся сквозь

тепловую площадку, ОСН, радиатор, печатную плату, и рассеивается в окружающей среде. Таким образом, тепловое сопротивление определяется локально, то есть сопротивление от СК до теплоотводящего ОСН зависит только от локальных параметров и, как следствие, каждое сопротивление независимо. К примеру, тепловое сопротивление от СК к радиатору не зависит ни от теплопроводности платы, ни от коэффициента теплопроводности радиатора. Чтобы проверить обоснованность данных допущений, было проведено моделирование с использованием CFD программного обеспечения светодиода Luxeon Rebel (Philips Lumileds), размещенного на плате. Процедура проверки была следующей. Некоторые параметры, такие как: теплопроводность платы, коэффициент теплопереноса, - изменялись в широком диапазоне с целью иллюстрации, а значения теплового сопротивления рассчитывались согласно техническому описанию светодиода. Графики, показанные на Рисунке 1.11, отражают наиболее важные результаты.

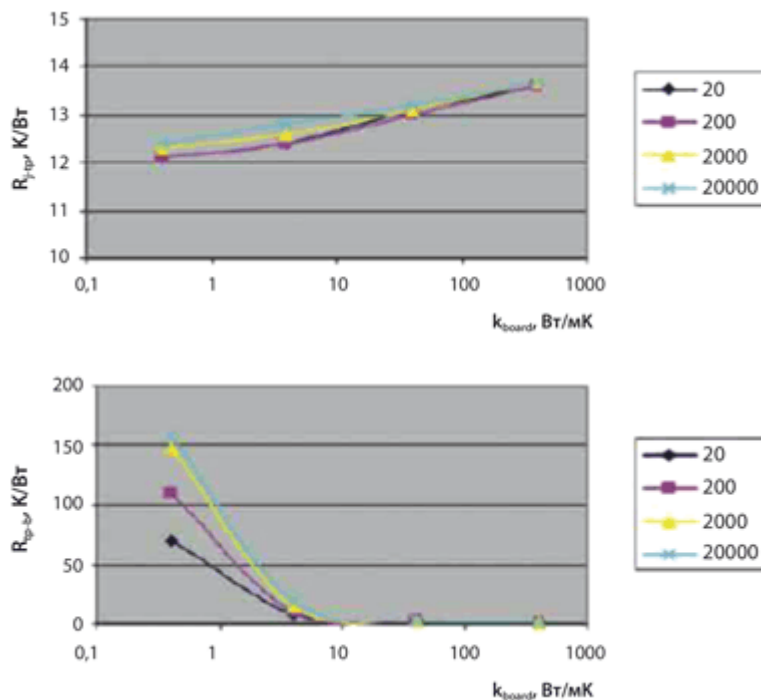


Рисунок 1.11 – Недостатки метода последовательного сопротивления при значениях коэффициента теплопереноса h 20...20000 Вт/м²К (вверху: тепловое сопротивление кристалл – теплоотводящая площадка; внизу: тепловое сопротивление теплоотводящая площадка – плата)

На верхнем рисунке показано тепловое сопротивление «кристалл – теплоотводящая площадка», которое должно зависеть только от размеров и теплопроводности площадки, а не от теплопроводности платы и коэффициента теплопереноса h . Во всем диапазоне изменения этих параметров мы видим отклонение в пределах 15%, что, вероятно, вполне приемлемо в решении большинства практических задач. Нижний рисунок отражает тепловое сопротивление теплоотводящей площадки – платы, в зависимости от ее теплопроводности и h . В данном случае, R_{th} должно быть пропорционально k_{board} и не зависеть от h . Видно, что возникают проблемы, когда эффективная проводимость платы становится менее 5 К/Вт, потому что величина указанных сопротивлений начинает зависеть от особенностей применения. Эта ситуация является следствием рассеяния тепла, когда невозможно разделить теплопроводность и конвекцию. Другими словами, метод последовательного сопротивления никогда не обеспечит независимую тепловую модель с граничными условиями. Однако имеются исключения.

Для многих СД высокой мощности поперечными температурными градиентами можно пренебречь. В таких случаях можно показать, что метод последовательного сопротивления вполне приемлем. Следует также заметить, что не во всех случаях обязательно корректное значение некоторых тепловых сопротивлений, потому что эти сопротивления могут не быть преобладающими в реальных условиях. Часто выясняется, что основным является тепловое сопротивление к окружающей среде, следовательно, неточности в опубликованных данных могут не быть критичными. Другие вопросы, связанные со стандартизацией и измерениями тепловых характеристик СД, рассмотрены в [48].

1.7 Анализ общих принципов вычислительной гидрогазодинамики

В современном мире довольно бурно совершенствуются способы математического анализа, базирующиеся на основополагающих формулах, описывающих физические процессы сплошных сред. Таким образом, появилась возможность численными методами описывать характеристики ламинарных и турбулентных течений любых видов сред, а также рассчитывать конвективные процессы, проходящие на границе твердого источника тепловой энергии и жидким или газообразным теплоносителями. Описанный метод расчёта реализуется с помощью численных методов и высокопроизводительных ЭВМ. Среди исследователей данной области такие технологии принято называть – «компьютерная гидрогазодинамика» (в англоязычном мире CFD). Использование этих методов при расчёте ТР значительно повышает уровень достоверности исследуемых характеристик, а также позволяет проектировать устройства с оптимальными режимами эксплуатации и тепловыми характеристиками [49].

Весь процесс решения задачи, непосредственно связанной с движением жидкости и газа, можно представить схематически как на Рисунке 1.12.

Основные определяющие уравнения, например: уравнения неразрывности, количества движения, энергии – для течений, имеющих практический интерес, обычно являются весьма сложными, и вычислить их точное решение не представляется возможным. Встает вопрос о необходимости использования методов численного решения. Применение вычислительных методов подразумевает замену дифференциальных уравнений нескольких переменных и их частных производных на систему линейных алгебраических уравнений, которая в итоге предоставляет перспективу получения решения с использованием компьютера.

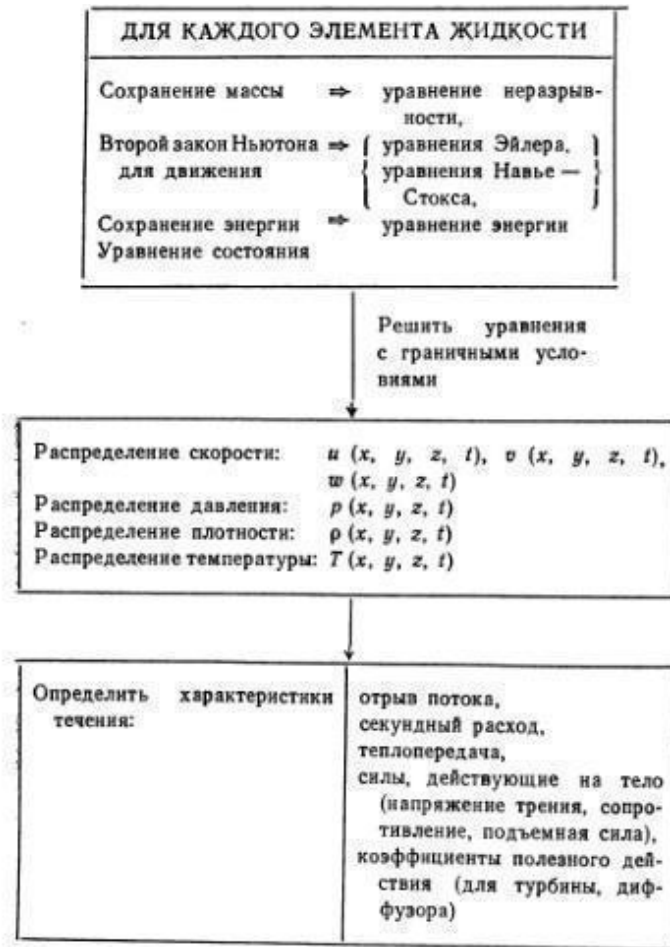


Рисунок 1.12 – Общие принципы вычислительной гидрогазодинамики

Использование локальных методов, таких как МКР, МКЭ, МКО и алгебраические уравнения, определяет взаимозависимость значений неизвестных переменных в области близлежащих узловых точек. Также в таком случае считается, что сетка, образованная отдельными точками, полностью покрывает область определения значений по времени, а также пространству. Таким образом, механизм перехода от непрерывных уравнений к совокупности алгебраических уравнений принято обозначать как дискретизация. Использование спектрального метода, в связи с его глобальностью, требует замещения неизвестных переменных, как правило, амплитудами. Следовательно, процесс составления алгебраических уравнений, являющихся результатом дискретизации, предлагается описать как конечно-разностный вид выражения (1.6).

$$\frac{dT}{dt} + u \frac{dT}{dx} - \alpha \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \text{ при } x_L \leq x \leq x_R \text{ и } t > 0. \quad (1.6)$$

где α – коэффициент тепловой диффузии;

$\frac{dT}{dx} + u \frac{dT}{dx}$ – конвективный член;

$\alpha \frac{d^2 T}{dx^2}$ – диффузионный член;

имеет вид:

$$\frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} + \frac{u(T_{j+1}^n - T_{j-1}^n)}{2\Delta x} = \frac{\alpha(T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n)}{\Delta x^2}, \quad (1.7)$$

где $x = j\Delta x$ и $t = n\Delta t$.

Для нахождения T_j^{n+1} при составлении алгоритма имеет смысл воспользоваться выражением (1.7) в условиях, когда решение определено в каждой точке x_j во временном слое n , т.е. записать

$$T_j^{n+1} = T_j^n - \left(\frac{u\Delta t}{2\Delta x}\right)(T_{j+1}^n - T_{j-1}^n) + \left(\frac{\alpha\Delta t}{\Delta x^2}\right)(T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n). \quad (1.8)$$

Повторное использование формулы (1.8) предоставляет возможность отыскать решение на временном слое $n+1$ для всех внутренних точек x_i . При изменении n на единицу, а также записи значений T^{n+1} в правую часть уравнения (1.8), можно провести маршевое движение дискретного решения с течением времени.

Использование локального численного метода, к примеру МКР, количество точек X_i , требуемое при нахождении достоверного решения, обычно связано с размерностью пространства, геометрическими свойствами и значением градиентов дифференциации неизвестных переменных.

Учитывая тот факт, что подавляющее множество задач гидрогазодинамики характеризуется нелинейными характеризующими уравнениями, как правило, процесс нахождения численного решения производится посредством итераций. Другими словами, решение каждой неизвестной переменной для каждой точки X_i шаг за шагом подправляется с помощью дискретизованных уравнений.

Процедура создания итераций зачастую равносильна продвижению решения на определенный небольшой момент времени. Количество итераций или временных отрезков изменяется в пределах от сотен вплоть до тысяч.

Непосредственно процедура дискретизации неизбежно ведет к появлению погрешности в вычислениях, которую возможно сократить с помощью уменьшения шага сетки, но только, когда уравнения подобные выражению (1.7), считаются достоверным представлением исходных характеризующих уравнений. В случае, когда количественный метод, осуществляющий итерацию, считается ещё и устойчивым, тогда численное решение можно приблизить к истинному решению насколько потребуется, уменьшая шаг сетки. Однако не стоит забывать, что при уменьшении шага сетки увеличивается время вычислений.

Обычно решение определяющих уравнений представляется в виде отдельных узловых значений, определенные методы решения ДУ, такие как спектральный метод и МКЭ, приводят к определению численного решения в непрерывном виде. Когда начальная задача обеспечивает плавность, описанные способы нахождения решения, показанных в [50], зачастую обеспечивают высокую достоверность для всех переменных, определяющих состав дискретизованных уравнений.

Выше изложены основы методов численного отыскания решения, которые являются основой для подавляющего большинства современных программных пакетов САЕ-направления. Такие методы дают возможность представить основы функционирования программного обеспечения (ПО) и подтверждают основание их использования в противовес широко используемых в современной практике

способов анализа ТР, базирующихся на применении усредненных характеристик исследуемого объекта:

- эффективная площадь взаимодействия теплоносителей;
- условного среднего коэффициента теплоотдачи;
- температурного напора и др.

Также эти способы полностью основываются на результатах, полученных эмпирическим путём, а также на теории подобия в виде факторных математических выражений, суммирующих такие результаты. В таком случае обеспечение ТР и адекватность анализа целиком основывается на приобретенном в процессе производства опыте конструирования экспериментальных образцов. При этом такой результат является довольно специфическим, и, чтобы перенести его на новые объекты исследований, требуются экспериментальные подтверждения.

1.8 Обзор методов расчёта тепловых режимов

1.8.1 Аналитический (теплофизический) метод

Аналитический метод (АМ) базируется на получении решения ДУ в численном виде и применяется для расчёта нестационарного ТР. При этом требуется записать персональные ДУ для всех внутренних элементов (областей) исследуемого объекта. Подобный метод даёт возможность принимать во внимание взаимные зависимости внутренних областей, а также их форму, габариты и свойства используемых материалов. Распространенные АМ, применяемые при расчёте динамических ТР, эффективно использовались лишь на ранних этапах развития ПП приборов. Данный факт объясняется тем, что в то время расчёты проводились в основном для транзисторов небольшой мощности, имеющих тянутые переходы. Эти транзисторы имели форму практически правильного прямоугольного параллелепипеда. Подобная форма допускает возможность представить транзистор как изотропный стержень, имеющий правильную форму и простые краевые условия

[51]. Пример конструкции, которая удовлетворяет условиям АМ при расчёте ТР, представлен на Рисунке 1.13.

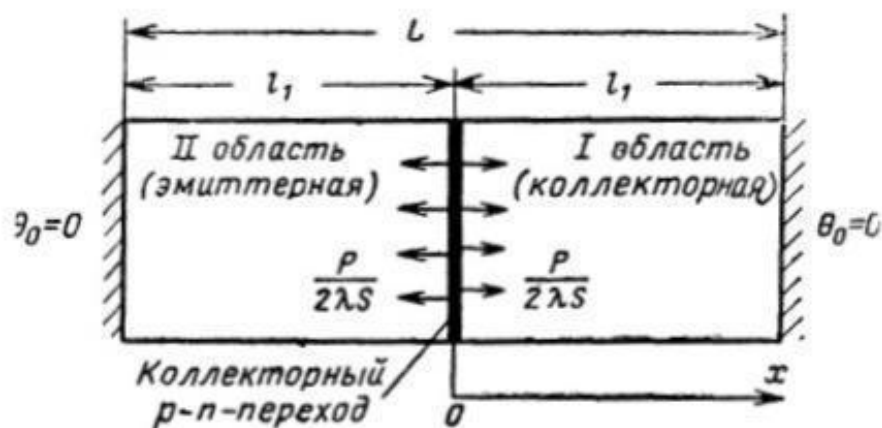


Рисунок 1.13 – Теплофизическая модель транзистора по методу Мартенсона

В целях значительного снижения сложности вычислений можно применить метод идеализации процессов, применение которого обуславливается особенностью функционирования рассматриваемого транзистора, а также простотой его геометрии. Суть идеализации:

- пренебрежение всеми механизмами теплообмена, кроме теплопроводности;
- теплоёмкость, также как и теплопередача, является константой;
- мощность, сообщаемая устройству, полностью рассеивается на $p-n$ -переходе.

Рассматривая АМ расчёта ТР в ПП устройствах, стоит сделать акцент на том, что результаты таких вычислений могут использоваться только в частных случаях и не позволяют получить удовлетворительного, с практической точки зрения, решения задачи [52]. Главной причиной непригодности в общем случае является то, что для каждого режима работы ПП устройства каждый раз требуется составлять собственную эквивалентную схему. Помимо всего прочего, примене-

ние АМ, подходящего исключительно в случае однородности исследуемой модели, как главного способа расчёта ТР в многослойной конструкции неидеального полупроводникового устройства, не только не позволяет получить удовлетворительный результат, а в значительной степени усложняет процесс его получения [53].

1.8.2 Графический (экспериментальный) метод

В настоящее время необходимость расчета ТР только растёт. В связи с тем, что обеспечить точность расчёта динамического ТР в многослойных ПП конструкциях реальных приборов довольно сложно, многие исследователи стали склоняться к мнению, что АМ является малоприменимым с практической точки зрения. В таком случае ТР ПП устройств необходимо рассчитывать только эмпирическими методами, то есть по их взаимодействию с типовыми факторами воздействия [54].

Таким образом, численные значения при анализе ТР ПП устройств можно определить с помощью графического представления переходной функции ТР. На рисунке изображается временная функция теплового сопротивления, определенная эмпирически. Зачастую в паспорте тепловые характеристики полупроводникового устройства описываются как изображение переходной функции, одно из таких представлено на Рисунке 1.14.

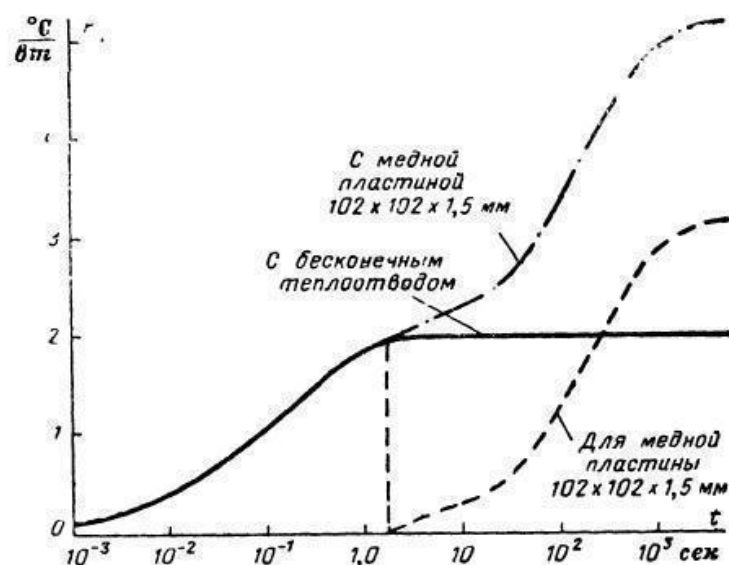


Рисунок 1.14 – Переходная тепловая функция тиристора (2N681)
с медным радиатором

Следовательно, в рассмотренном методе применяются экспериментально полученные данные, которые являются единственным способом количественной оценки входных данных для моделирования на последующих этапах. Этот метод значительно упрощает вычисления на стадии сбора материалов, в отличие от дальнейших этапов, на которых происходит непосредственный расчет данных. Последующее применение их в графическом виде оправдано лишь в случае графоаналитических методов, результаты которых имеют значительные погрешности и, к тому же, весьма громоздки [57].

1.8.3 Метод поэтапного моделирования

Основу метода составляет разбиение структуры ПП устройства на дискретные элементы (или области) с учётом весомости, с последующим математическим моделированием каждой области. В итоге конечное количество математических моделей рассчитывается посредством АМ и численных методов. Одной из харак-

терных черт метода поэтапного моделирования ТР является потребность в анализе одного и того же физического процесса для всего устройства или системы устройств. При этом нельзя пренебрегать тепловым взаимодействием наиболее весомых элементов системы, работающих на разных физических принципах. Модель такого теплофизического процесса представляет собой сочетание множества областей нетривиального характера с генераторами и ресиверами тепловой энергии, в которых происходит движение текучих (жидких или газообразных) транспортировщиков тепловой энергии. Максимально общая математическая модель ТР конструкта представляется как система ДУ, предназначенная для расчёта тепловых процессов твёрдых объектов, а также формул энергии, составленных для потоков текучих сред, с краевыми условиями 1, 2 и 3-го порядка.

1.8.4 Метод конечных разностей (МКР)

Чтобы рассчитать нестационарный ТР, можно воспользоваться дифференциальным уравнением Фурье-Кирхгофа, записанное как:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T).$$

Данное уравнение позволяет установить связь между временными и пространственными параметрами температуры для каждой точки исследуемого объекта. В случае, когда известны краевые условия, можно найти численное решение вышеописанного уравнения с помощью программно-аппаратного комплекса инженерного анализа. Суть МКР сводится к замещению производных конечноразностными аппроксимациями в выражении, описывающем конвективный теплообмен. Главным вопросом при получении конечных аппроксимаций начальных и граничных дифференциальных задач становится возникновение конфликта, который заключается в обеспечении необходимого качества аппроксимации при удовлетворительном результате расчёта производных алгебраических конструкций.

МКР в моделировании ТР предполагает описание твёрдого объекта как множества узлов. В итоге упрощения частных производных ДУ Фурье-Кирхгофа с помощью МКР получают комплекс линейных уравнений, пригодных при анализе ТР в качестве частного параметра для каждого отдельного узла сетки. Подобный комплекс представляет собой незамкнутую систему, а замкнуть этот комплекс позволяет разностный вид краевых условий [58]. Преобразуя все условия, получаем требуемую замкнутую систему алгебраических уравнений, определяемую алгебраическими вычислениями, посредством ЭВМ.

1.8.5 Метод конечных элементов (МКЭ)

Следующий рассматриваемый метод является численным методом, основанным на замещении объекта исследования множеством его элементов. Впоследствии для каждого такого элемента производится грубый расчёт ТР. МКЭ основывается на составлении для всех элементов ДУ теплообмена с краевыми условиями, описывающих механизмы передачи тепловой энергии на граничных поверхностях каждого отдельного элемента, и дальнейшее их решение. Сложение полученных решений с соблюдением необходимых условий моделирования даёт решение для объекта в целом.

Суть метода конечных элементов можно описать так: предположим, что существует некая область поиска значений, заключенная в контур L , пример такого элемента представлен на Рисунке 1.15.

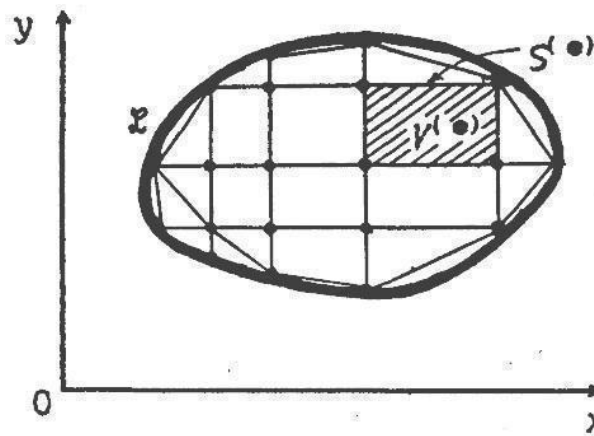


Рисунок 1.15 – Разбиение области на элементы

В рассматриваемой области, а также по контуру L , отложим произвольное множество точек с координатами $X_i (i = 1, 2)$. Обозначим как U_i – значения, которые принимает вычисляемая функция в заданных точках, расставленных на предыдущем этапе. Проведем прямые линии по этим точкам, тем самым образуя элементы. Суммирование всех элементов аппроксимирует всю исследуемую область, ограниченную L . Также производится замещение криволинейных отрезков контура L на прямолинейные. Следует принять во внимание, что образованная в результате такого разбиения сетка, позволяющая найти решение для исходного (цельного) элемента, не имеет постоянной геометрии и схемы соединений. Из этого следует, что вид и форма элементов обычно легко видоизменяются, а топология не требует четко определенного строения. Отсутствие строгих требований к топологии позволяет МКЭ быть геометрически эластичным.

В заключении рассмотрения метода конечных элементов представим список достоинств, описанных в [59], сделавших возможным использование данного метода во многих программных пакетах, связанных с моделированием ТР, а также расчётами в теории поля:

- представляется множество способов указания краевых условий на выделенных элементах границы, как внутренней, так и внешней исследуемой области;
- возможность замены криволинейных областей на границе элемента с помощью прямолинейных;
- реализация метода не зависит от размеров и формы исследуемых объектов;
- постоянная структура при общем интегрировании элементов объекта, не обязательна;
- природа материала может быть уникальной для отдельно взятого элемента в области, и более того, являться анизотропной;
- повышение точности результатов расчёта достигается за счет измельчения сетки, сдерживаемое только возможностями вычислительной машины;
- в связи с формированием узловых точек, матрицы жёсткости определены как ленточные, из-за того, что имеют много нулей, не фиксируемых в памяти.

1.9 Современное состояние вопроса обеспечения термостабильности полупроводниковых осветительных устройств

Одной из главных задач при разработке СД приборов является вопрос обеспечения требуемого температурного режима [60] и, следовательно, температурной стабильности основных характеристик ФСИС в условиях внешних тепловых воздействий (со стороны окружающей среды), а также внутренних (генерация тепловой энергии в СК [61]). Термостабильностью называют необходимую устойчивость основных параметров ФСИС в определенном интервале значений температуры внешних условий. Следовательно, термостабилизация - это целена-

правленное проектирование процесса переноса тепловой энергии в паре «ФСНМФСНМ – внешние условия».

Многочисленные работы, опубликованные как в отечественных, так и в зарубежных литературных источниках, связанные со светодиодным освещением, в подавляющем большинстве посвящены вопросу обеспечения температурной стабильности приборов на основе СД. Можно выделить несколько направлений в этих работах:

- подбор и расчёт радиаторов;
- методы снижения теплового сопротивления «светодиодный кристалл – окружающая среда»;
- локализация СК.

Большинство работ связано с осветительными приборами на основе корпусированных светодиодов. Как правило, алгоритм исследования включает в себя моделирование теплового режима посредством ПО, базирующегося на МКЭ, и экспериментальное подтверждение полученных результатов [62]. Моделирование позволяет с минимальными временными и ресурсными затратами подобрать наиболее подходящий вариант конструкции прибора. Исследователи имеют массу вариантов изменения таких параметров как: количество и мощность СД, расположение на ОСН, форма и материал теплоотвода, объём и заполнение камеры (в случае осветительных приборов закрытого типа) и другие, в зависимости от каждого конкретного случая. Таким же образом исследуются методы снижения теплового сопротивления. Современные программные комплексы позволяют с высокой степенью достоверности определить температурные режимы, даже учитывая нанесение тонких плёнок различных материалов, как в работе [63].

Подтверждение результатов компьютерного моделирования осуществляется посредством постановки натурального эксперимента, где изготавливается экспериментальный образец в соответствии с компьютерной моделью (либо обратное – модель строится по образцу). Основным методом вычисления во многих работах (как, например, в [64-67]) является измерение температуры корпуса в контроль-

ной точке с помощью термопары, а также, как в работах [66-68] и других, определяется температурное поле и значения температуры использованием тепловизионной съёмки.

Существенно отличается методика экспериментального подтверждения данных моделирования тепловых режимов в случае с осветительными устройствами на основе СД элемента ленточного типа, также известного под названием филаментная нить (filament LED), которому посвящена настоящая работа, в особенности с лампами со стеклянной герметичной колбой. Первый метод – измерения температуры ОСН с помощью термопары - весьма затруднителен, так как довольно сложно обеспечить герметичность стеклянной колбы при установке термопары внутри лампы. Второй подход - с использованием тепловизора - является малоинформативным, так как стеклянная колба является непрозрачной для ИК-лучей и при съёмке тепловизором определяется только температура поверхности лампы. На момент создания литературного обзора в доступных печатных источниках не было обнаружено описания адекватного метода экспериментального подтверждения результатов компьютерного моделирования тепловых режимов осветительных приборов на основе филаментных СД.

1.10 Задача термокомпенсации в одномерных массивах источников тепловой энергии на примере филаментной нити

Большая часть работ в области исследований тепловых режимов СД осветительных приборов, как описано в предыдущем пункте, ориентирована на устройства, основанные на корпусированных светодиодах, которые располагаются на массивных корпусах. Соответственно, задача термокомпенсации сводится к экспериментальному подбору локализации светодиодов, которые представлены как точечные источники тепловой энергии (ИТЭ). Такой подход сложно считать универсальным, так как в подобной системе имеет существенное влияние множество параметров, как, например, форма, размер, материал ОСН, на котором располага-

ются ИС. Настоящая работа посвящена светодиодным филаментным нитям, которые, с определенными допущениями, можно представить как одномерный массив ИТЭ – СК, непосредственно размещенных на ОСН. Задача термокомпенсации в таком случае сводится к определению расстояния между СК для выравнивания температурного профиля, тем самым уравнивается рабочий температурный режим каждого СК ФСНМ, а также снижается максимальная температура всего устройства в целом.

2 Моделирование теплового режима

2.1 Светодиодная филаментная нить

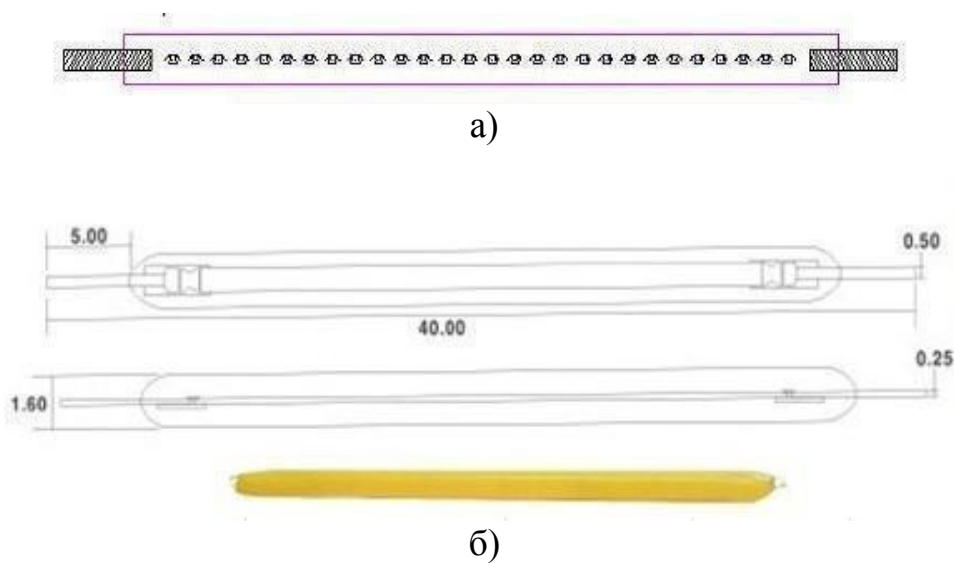
ФСНМ призваны заменить вольфрамовые спирали в привычной стеклянной колбе со стандартными цоколями типоразмеров E14 и E27. Они являются инновационной заменой привычных ЛН, а также энергосберегающих КЛЛ (Рисунок 2.1) [69]. В источнике [70] лишний раз подтверждается, что стоимость подобных СД ИС близка к стоимости КЛЛ, однако, потребляемая электрическая мощность ФСИС практически вдвое меньше. При этом, как уже отмечалось в настоящей работе, значительное место при разработке современных ИС с ФСНМ занимает задача гарантированного поддержания температурной стабильности всех основных параметров.



Рисунок 2.1 – Филаментная светодиодная лампа

ФСНМ представляет собой следующую конструкцию: ОСН, на котором эквидистантно закреплены посредством клея с высокой теплопроводностью светодиоды, соединённые последовательно проволочным проводником (Рисунок 2.2,а). Изготовление ФСНМ реализуется по технологии «Кристалл на плате» (Chip-on-Board или COB) [71]. Данная технология основана на установке СК на ОСН без корпусов и керамических ОСН, затем вся конструкции, за исключением электрических выводов, покрывается общим слоем люминофорной композиции, на осно-

ве силиконового компаунда [72]. Типовые размеры такой нити представлены на Рисунке 2.2, б. при производстве по технологии COB СК располагаются намного ближе друг к другу, нежели по технологии поверхностного монтажа корпусированных светодиодов (SMD). Технология COB позволяет достичь на современном уровне развития плотность размещения до 70 СК на 1 см^2 , однако, в большинстве практических случаев, одна светодиодная нить насчитывает от 20 до 30 СК [73].



а) внутренняя структура ФСНМ

б) габаритные размеры и внешний вид [74]

Рисунок 2.2 – Типовая конструкция ФСНМ:

Наиболее распространенным методом крепления СК на ОСН является приклеивание с помощью клея с высокой теплопроводностью. При этом встречаются клеи электропроводящие, в таком случае необходимо особое внимание уделять дозировке клеящего состава, так как при избытке клея состав может касаться проводочных проводников и, в свою очередь, привести к короткому замыканию и последующему выходу из строя нити. Пример установки СК и электрического соединения представлен на Рисунке 2.3.

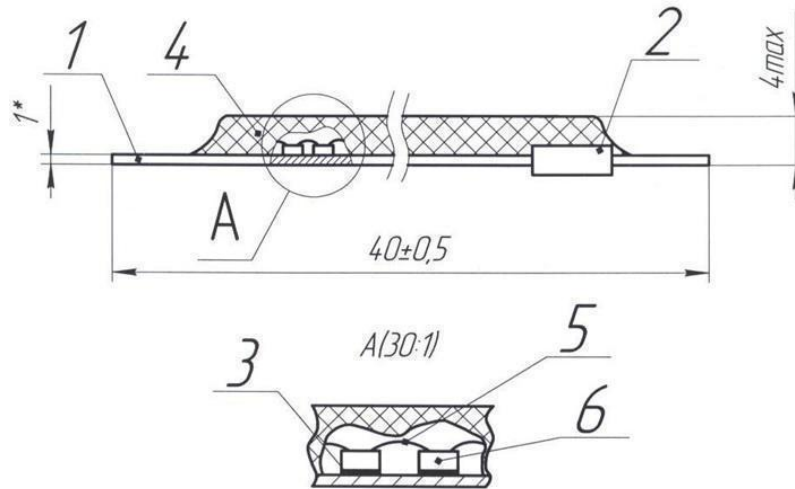


Рисунок 2.3 – Размещение СК

На Рисунке 2.3 позиция: 1 – металлическое ОСН, 2 – изолятор-крепление, 3 – клей с высокой теплопроводностью, 4 – люминофорная композиция, 5 – проволочный соединительный проводник, 6 – светодиодный кристалл без корпуса.

В состав конструкции ФСНМ может входить от одного до двух изоляторов-креплений электрических контактов, в зависимости от материала ОСН. В случае, когда используется электропроводящий материал ОСН, обычно достаточно использовать только один изолятор. Это обусловлено тем, что край электропроводной ОСН может использоваться в качестве токоввода. Электрическое соединение проволочного проводника, соединяющего кристаллы, производится непосредственно на ОСН. Второй контакт нити присоединяется к ОСН через крепление из изоляционного материала, во избежание короткого замыкания. Изоляционное крепление обычно изготавливается из пластика. На Рисунке 2.4 слева представлено изображение ФСНМ с электропроводящим ОСН, справа – с диэлектрическим.

ОСН, как уже упоминалось выше, можно разделить на два вида: электропроводящие и диэлектрические.

Металлические ОСН в основном изготавливаются из полированной стали либо стали с покрытиями на основе никеля или хрома. Также возможно изготовление из алюминия. Металлические ОСН обладают такими преимуществами, как

относительно высокая механическая прочность, высокая теплопроводность и менее сложная конструкция нити, что, в свою очередь, положительно сказывается на надёжности.

Одним из самых распространённых диэлектрических видов ОСН в настоящее время является ОСН из монокристаллического сапфира (Al_2O_3 - оптический лейкосапфир) и из кварцевого стекла. Интерес к оптическому лейкосапфиру обуславливается такими факторами как:

- невысокий температурный коэффициент (ТК) линейного расширения (ТКЛР), находящийся в диапазоне значений от $3,24 \times 10^{-6}$ до $5,66 \times 10^{-6} K^{-1}$;
- большой коэффициент внутреннего светового пропускания (достигает 85%);
- более длительный срок службы, для ФСНМ (до 40000 ч).

Внешний вид СД нитей с металлическим ОСН (слева) и сапфировым ОСН (справа) представлен на Рисунке 2.4.

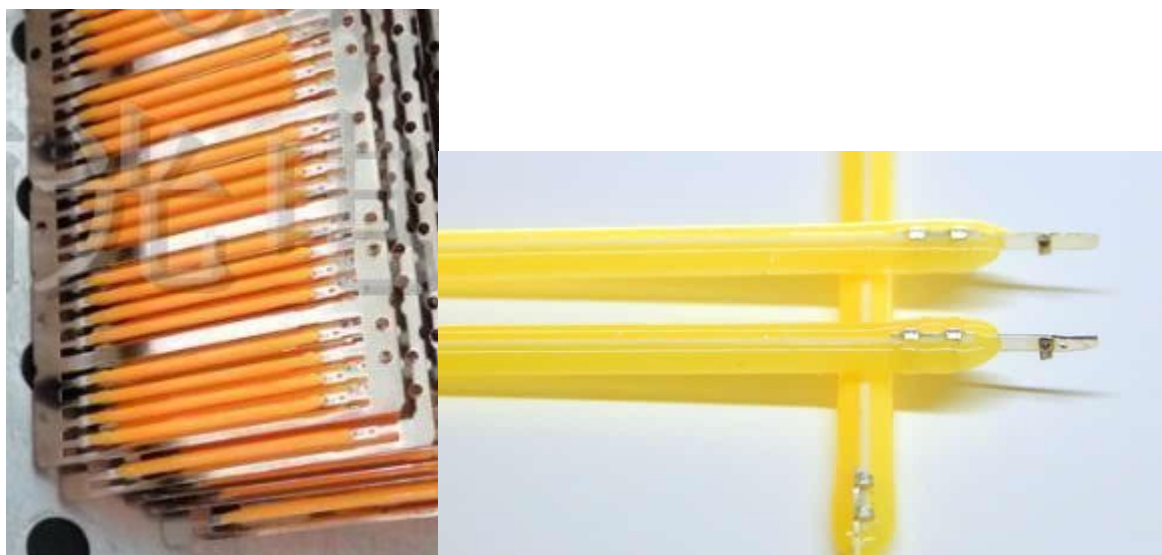


Рисунок 2.4 – Внешний вид ФСНМ с электропроводящим ОСН *слева*, и с диэлектрическим *справа* [75]

Используются маломощные СК, обычно электрическая мощность одной ФСНМ составляет около 1 Вт. Типовые варианты конструкции представлены на

примере СК компании SemiLeds (Рисунок 2.5), здесь *слева* представлен вариант вертикальной конструкции светодиода на медном основании и *справа* горизонтальная конструкция на сапфировом основании. Наиболее распространены кристаллы второго типа, так как электрическое соединение светодиодов осуществляется последовательно, а на металлическом основании подобную схему реализовать затруднительно.

Однако на диэлектрическом ОСН нити можно организовать последовательное соединение следующим образом: *n*- электроды подключить с помощью проволочного проводника, а *p*- электроды посредством токопроводящего клея.

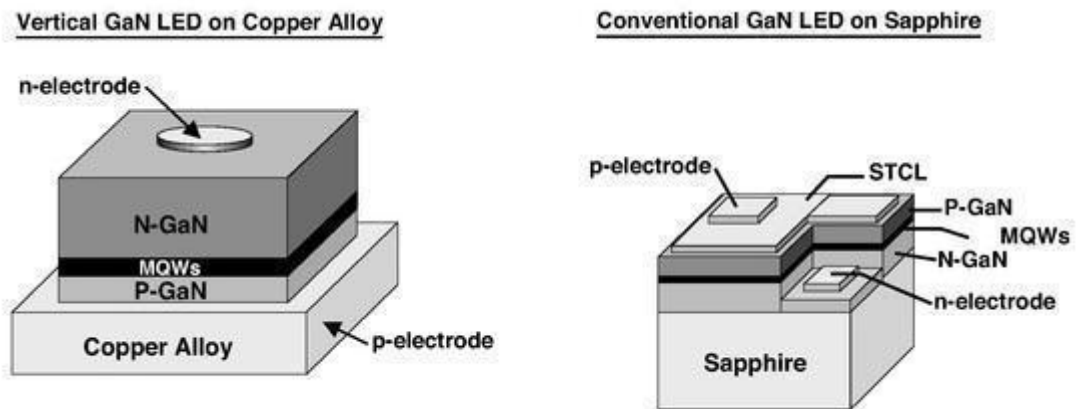


Рисунок 2.5 – Вертикальная конструкция СД *слева* и горизонтальная *справа* [76]

Люминофорная композиция является неотъемлемой частью при создании высокоэффективных СД приборов, в основе которых лежат твёрдые соединения GaN, InGaN AlInGaN. Люминофорная композиция и технология нанесения оказывают существенное влияние на основные параметры полупроводникового светового прибора, такие как КЦТ и световая отдача. Основу люминофорного покрытия СК составляет оптически прозрачная полимерная композиция на базе силикона (диэтилполисилоксана) с добавлением порошковых люминофоров, смешанных в необходимых долях. В качестве базового люминофора, как правило, используется жёлто-зелёный, чей спектр возбуждения совпадает со спектром излучения СК. Спектр такого люминофора лежит в видимом диапазоне длин волн,

композиция, ввиду сравнительно высокой теплопроводности, также оказывает незначительное влияние на общую картину температурного поля. Кроме того, люминофорный компаунд является пассивным элементом системы при модификации тепловых параметров ФСНМ.

2.2 Тепловая модель филаментной нити

Тепловая модель СД приборов, построенная по методу тепловых сопротивлений, подробно рассмотрена в [78–81], в рамках настоящей работы перейдем к рассмотрению математической модели.

Объект исследования представляет собой сборочную единицу (Рисунок 2.7), состоящую из ОСН 1 и массива СК 2. ОСН характеризуется размерами $l \times k \times m$. Структура ОСН изотропная. ИТЭ N СК, установленных на верхней стороне ОСН, в координатах:

$$x_{i1} \leq x_i \leq x_{i2}; y_{i1} \leq y_i \leq y_{i2}; m \leq z_i \leq (m + h_{\text{КР}}), \quad (2.1)$$

где x_{i1}, x_{i2} – габаритные координаты по оси абсцисс;

y_i, y_{i2} – габаритные координаты по оси ординат;

$h_{\text{КР}}$ – высота СК.

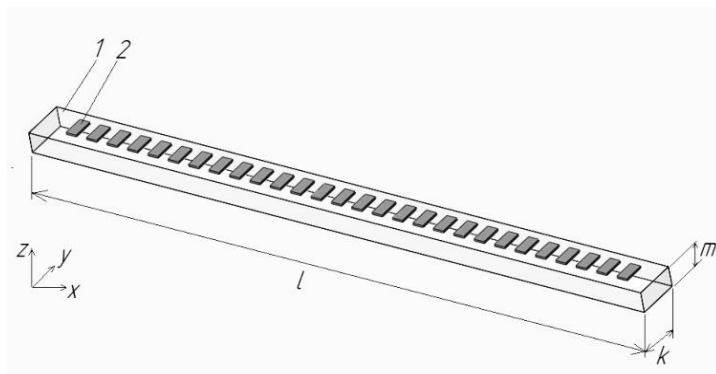


Рисунок 2.7 – Геометрическая модель ФСНМ

Конвективный теплообмен примем основным механизмом передачи тепловой энергии. Процесс теплопередачи представим как уравнение теплопроводности в частных производных [81]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\sum_{i=1}^N q_i(x_i, y_i)}{m}, \quad (2.2)$$

где c – коэффициент теплоемкости;

ρ – плотность;

λ – коэффициент теплопроводности;

τ – время;

q_i – тепловой поток i -го СК.

Для определения стационарного ТР (основной ТР ФСНМ) требуется решить менее сложную задачу:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\sum_{i=1}^N q_i(x_i, y_i)}{m} = 0. \quad (2.3)$$

Плотность теплового потока неравномерно распределяется в объёме исследуемого объекта и определяется выражением [82]:

$$q_i(x_i, y_i) = \begin{cases} \frac{P_i}{(x_{i2} - x_{i1})(y_{i2} - y_{i1})}, \\ 0, \text{вне кристалла,} \end{cases} \quad (2.4)$$

где P_i – мощность тепловыделения i -го СК.

На поверхностях ОСН действуют граничные условия третьего рода, которые описывают протекание теплообмена на границе раздела «поверхность – окружающая среда»:

$$\left[\mp \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_{\text{CP}} - T) \right]_{x=0,l}; \left[\mp \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha (T_{\text{CP}} - T) \right]_{y=0,k};$$

$$\left[\mp \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha (T_{\text{CP}} - T) \right]_{z=0,m}, \quad (2.5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией (КТК);

T_{CP} – температура окружающей среды.

С физической точки зрения КТК α определяет мощность, рассеиваемую единицей поверхности ОСН посредством конвекции, когда разница температур тела и окружающей среды составляет 1 К. В математическом плане КТК является функцией девяти переменных, оказывающих влияние на протекание теплообмена [83]:

$$\alpha = \alpha(T, T_{\text{CP}}, \beta, \lambda_{\Gamma}, c_{\Gamma}, \nu, a, g, \Phi), \quad (2.6)$$

где β – коэффициент объемного расширения газа;

λ_{Γ} – коэффициент теплопроводности газа;

c_{Γ} – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении;

ν – коэффициент кинематической вязкости газа;

g – ускорение силы тяжести;

Φ – обозначение параметров, описывающих геометрические свойства, характер поверхности ОСН и размеры.

2.3 Задача оптимизации тепловых режимов ФСНМ

Известно, что ОСН из никелированной стали, также как из любых других материалов, в стационарном ТР характеризуются градиентом температур вдоль главной оси ОСН. При этом температурный градиент является причиной эффекта появления разных рабочих температур СК, которые связаны с расположением СК на поверхности ФСНМ [84].

Как показано в пункте 1.3 литературного обзора настоящей работы и в исследованиях отечественных и иностранных коллег, неодинаковые рабочие температуры СК напрямую воздействуют на устойчивость световых характеристик. В работе [85] определено воздействие температуры ПП ИС на КЦТ его излучения. Влияние температуры на величину светового потока СК, не покрытого люминофором, описывается выражением [86]:

$$I(T) = I(300K) \exp\left(\frac{T - 300}{T_C}\right), \quad (2.7)$$

где $I(300\text{ K})$ – световой поток при температуре СК 300 К;

T_C – характеристическая температура СК.

Также влияние температуры на выход излучения из люминофора определяется формулой Мотта [87]:

$$\eta(T) = \frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_\alpha}{kT}\right)}, \quad (2.8)$$

где A – константа тушения;

E_α – кажущаяся энергия активации тушения люминесценции;

η_0 – квантовый выход люминесценции при нормальных условиях.

Таким образом, влияние температуры на световой поток для конструкции СК + люминофор можно описать следующим выражением [88]:

$$I(T) \approx I(300K) \exp\left(\frac{T - 300}{T_c}\right) \times \left[\exp(-\mu d) \times \exp(-\nu d) \left(\frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)} \right) \right] \quad (2.9)$$

где μ – коэффициент рассеяния люминофора;

d – толщина слоя люминофора;

ν – коэффициент поглощения люминофора.

На сегодняшний день экспериментально определена количественная характеристика зависимости светового выхода от рабочей температуры СК. К примеру, в работе [89] представлены результаты исследования светового выхода мощных СД. Согласно проводимым исследованиям, световой выход при температурах p - n -перехода СК в итоговой конструкции (75-110 °С) находится на уровне 85–90 % от показателей при температуре 25 °С.

На основе вышеописанного, можно определить следующую задачу. В целях повышения стабильности основных характеристик ФСНМ, в первую очередь светотехнических, необходимо обеспечить одинаковые рабочие температуры СК. Чтобы выпрямить температурный профиль вдоль главной оси ОСН, требуется определить пространственное расположение СК, при котором кривизна температурного профиля \square была наименьшей. В таком случае задача обеспечения плоского температурного профиля заключается в определении функции локализации СК на ОСН с целью минимизации кривизны K для характерной точки профиля x :

$$\left(\frac{\partial T(x)}{\partial x} \right) = \min \quad (2.10)$$

2.4 Кривизна температурного профиля. Функция локализации источников тепловой энергии

Начальное условие процесса теплопередачи:

$$T|_{\tau=0} = T_0(x, y, z). \quad (2.11)$$

Обозначим температуру точки, совпадающей геометрическому центру места установки СК на ОСН, как u_i , причем в соответствии с [90–91]:

$$u_1 \neq u_2 \neq \dots \neq u_i \neq \dots \neq u_N. \quad (2.12)$$

Допустим, что СК располагаются на одном уровне по оси ординат:

$$y_1 = y_2 = \dots = y_i = \dots = y_N. \quad (2.13)$$

В таком случае неизвестная функция (2.10) будет определяться исключительно координатой x :

$$Loc(x_i, y_i) = Loc(x_i, y | \text{const}) = Loc(x_i). \quad (2.14)$$

Опираясь на вышеизложенное, можно сделать заключение: неравномерность температурного профиля вдоль главной оси ОСН связана с конечным значением коэффициента теплопроводности λ и процессом переноса тепловой энергии за счёт конвекции.

Температурный профиль вдоль главной оси ОСН u_i можно представить в виде траектории движения точки $\varphi(x)$ по этой оси. В таком случае появляется возможность провести количественную оценку нелинейности профиля посредством выражения, определяющего кривизну плоской линии в точке профиля x [92]:

$$K = \frac{\left| \frac{d^2\phi}{dx^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 \right)^{3/2}} \quad (2.15)$$

Кривизна плоской линии K представляет собой вторую производную уравнения переходной кривой. Повсеместно используемым видом такого уравнения является кубическая парабола вида [93]:

$$\phi(x) = \frac{x^3}{6LR}, \quad (2.16)$$

где L – общая длина дуги траектории;
 R – круговой радиус.

В целях нахождения неизвестной функции локализации $Loc(x_i)$ можно прибегнуть к методу дихотомии [94]. Этот метод подразумевает, что, в первую очередь, длина ОСН разделяется пополам, так как температурный профиль изотропного тела в случае эквидистантного расположения ИТЭ симметричен. Центральная точка определяется координатой $x_c = l/2$, где l – длина ОСН.

В первую очередь, рассмотрим случай с *чётным* количеством СК. Ниже следующие рассуждения будем строить относительно правой половины ОСН. В таком случае начало координат теперь лежит в точке x_c : $x'_0 = x_c$. На отрезке $[x'_0; l]$ будет располагаться $N' = N/2$ СК. Для дальнейших действий присвоим коэффициенту дихотомии *Coeff* значение из диапазона от 1,1 до 2,0, т.е. от 10% до 100%.

На Рисунке 2.8 представлен алгоритм действий, предлагаемый для локализации СК на ОСН.

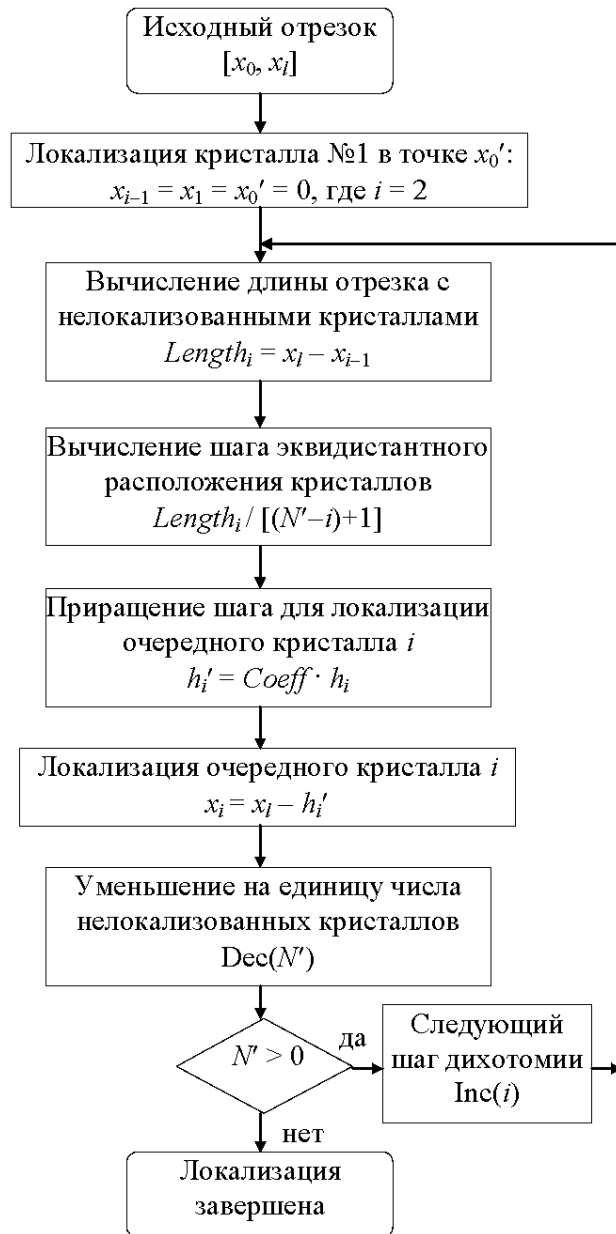


Рисунок 2.8 – Алгоритм дихотомии

Рассматривая алгоритм дихотомии, не сложно заметить, что он обладает цикличностью, и что, в свою очередь, позволяет построить рекуррентную формулу для локализации СК. Приращение шага при определении координат очередного СК i есть величина:

$$h'_i = Coeff \cdot \frac{l - x_{i-1}}{(N' - i) + 1}. \quad (2.17)$$

Координата очередного СК i определяется формулой:

$$x_i = x_{i-1} + \text{Coeff} \cdot \frac{l - x_{i-1}}{(N' - i) + 1}. \quad (2.18)$$

Данное выражение можно определить как функцию локализации, которая зависит от аргумента i и параметра Coeff :

$$x_i = \text{Loc}(i, \text{Coeff}), \quad (2.19)$$

где i – номер СК;

$i \in [2; N']$;

$\text{Coeff} \in [1, 1 \dots 2, 0]$ – коэффициент дихотомии. Процесс локализации проиллюстрирован Рисунком 2.9.

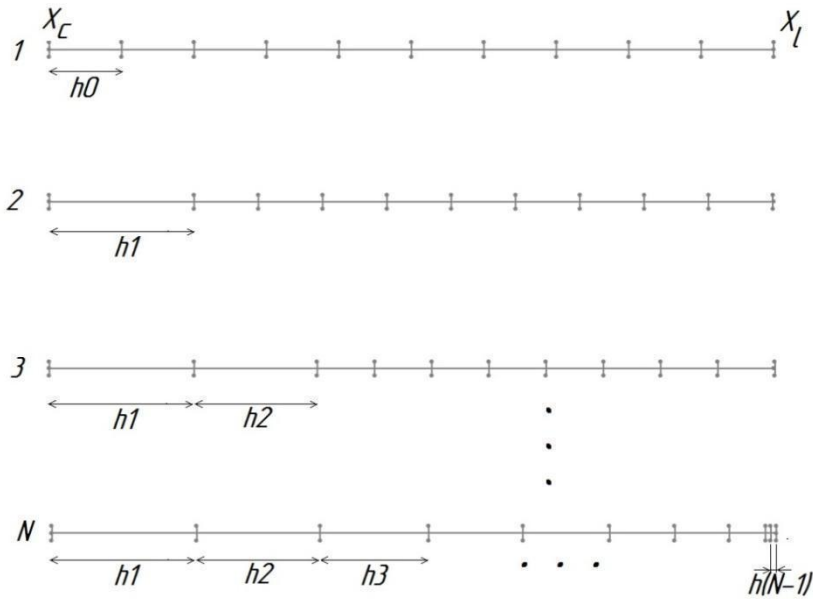


Рисунок 2.9 – Иллюстрация процесса локализации СК

Проанализируем функцию (2.15). Обозначим константы в составе (2.18) как:

$$C_1 = x_{i-1}; C_2 = x_l; C_3 = N' + 1. \quad (2.20)$$

Таким образом, функция локализации (2.18) примет вид:

$$\text{Loc}(i, \text{Coeff}) = C_1 + \text{Coeff} \cdot \frac{C_2 - C_1}{C_3 - i}. \quad (2.21)$$

Вид функции локализации (2.21) говорит о том, что она относится к классу вида гипербол, представленных на Рисунке 2.10.

$$Y = A + \frac{B}{C - X}. \quad (2.22)$$

При *нечётном* количестве СК установочный шаг алгоритма дихотомии является фиксацией в координате x_c СК с номером $i = (N + 1)/2$, т.е. фиксация центрального СК на середине ОСН. Тогда на отрезке $[x'_0; l]$ будет располагаться $N' = (N - 1)/2$ СК. Затем процесс дихотомии выполняется по (2.18).

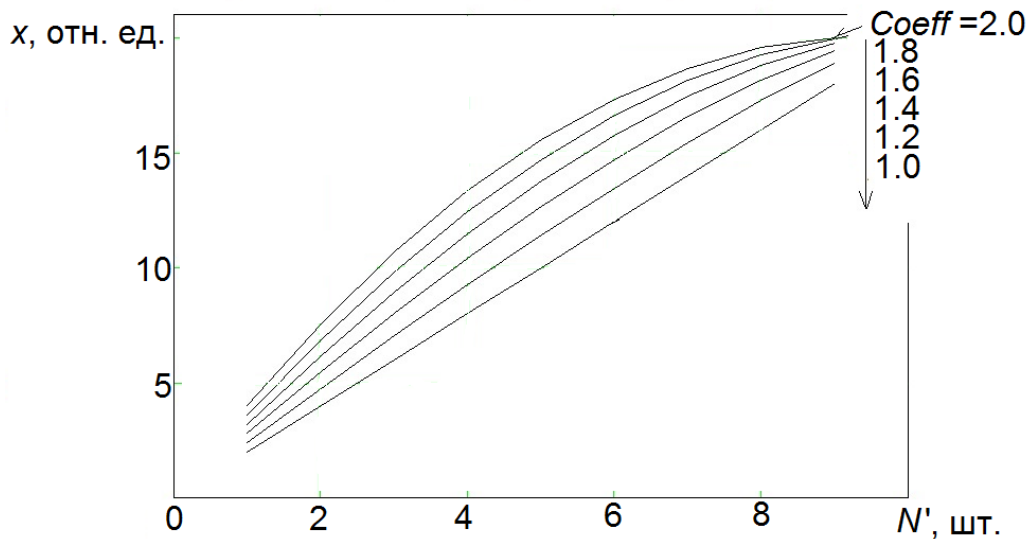


Рисунок 2.10 – Семейство функций локализации

Последовательно полученные функциональные зависимости можно подставить в количественный критерий (2.15). Также учитывается только правая часть ОСН. В результате получим:

$$K = \frac{\left| \frac{d^2\phi(x)}{dx^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{d\phi(x)}{dx} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\left| \frac{d^2\phi(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{d\phi(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (2.23)$$

Рассматривая полученное выражение (2.23), можно сделать заключение: существует такое значение параметра *Coeff*, при котором для точки x кривизна профиля $K \rightarrow \min$. Поиск этого значения параметра *Coeff* в общем виде можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial K}{\partial \text{Coeff}} = 0. \quad (2.24)$$

Имеет смысл свести решение (2.24) к численному дифференцированию функции:

$$\frac{\partial}{\partial \text{Coeff}} \frac{\left| \frac{d^2\phi(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{d\phi(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \approx \frac{K(\text{Coeff} + \Delta \text{Coeff}) - K(\text{Coeff})}{\Delta \text{Coeff}} = 0. \quad (2.25)$$

Из вышеописанного следует, что в математической модели механизма теплопередачи, которая описана в п. 2.2 для ОСН с N точечными ИТЭ (2.2), определено понятие функции локализации (2.18) для одномерного случая неэквидистантного размещения СК вдоль главной оси ОСН. Семейство функций локализации, которые различаются коэффициентом дихотомии, относится к классу гипербол. При этом, с физической точки зрения, коэффициенты гиперболы (2.18) представляют собой характеристики сборочной единицы ФСНМ (длина ОСН, количество размещаемых СК, коэффициент дихотомии), от которых зависит процесс локализации СК на ОСН.

2.5 Математическая модель обеспечения комплексной температурной стабильности

Адекватное решение в поиске подходящего способа термостабилизации ФСИС напрямую связано с наличием глобально-оптимизирующего критерия, способствующего количественно определить основные правила, которые предъявляются к обеспечению стабильности ТР разрабатываемого устройства. Родоначальниками комплексного подхода в решении задач температурной стабильности в радиоэлектронных средствах являются Гусев В.П. и Фомин А.В. [95]. Описанный ими подход представляет собой частный случай в оценке электрических допусков, а также производственных погрешностей электронных устройств.

Предположим, что результирующий параметр ФСИС можно представить функцией множества неизвестных:

$$N = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (2.26)$$

где N – выходной параметр ФСИС;

q_1, q_2, \dots, q_n – параметры СК.

Большая часть характеристик СК есть функции температуры, величины которых можно определить как:

$$q = q_0 [1 + \alpha(T - 293)] \quad (2.27)$$

где q_0 – величина параметра СК при температуре 293 К;

α – ТК данного параметра;

T – рабочая температура.

При этом замена характеристик СК в (2.26) функциями, зависящими от температуры (2.27), позволяет определить аналитическую связь результирующего параметра ФСИС N от характеристик СК и значений температуры:

$$N = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n, T) \quad (2.28)$$

Искомую функцию множества неизвестных, если она может быть преобразована с помощью метода полного дифференциала, представим в виде:

$$dN = \frac{dN}{\partial q_1} \partial q_1 + \frac{dN}{\partial q_2} \partial q_2 + \dots + \frac{dN}{\partial q_n} \partial q_n + \frac{dN}{\partial T} \partial T \quad (2.29)$$

Преобразуя дифференциальное выражение в уравнение с конечными приращениями, если при этом последние достаточно малы, выражение (2.29) будет иметь вид:

$$\Delta N = \frac{dN}{\partial q_1} \Delta q_1 + \frac{dN}{\partial q_2} \Delta q_2 + \dots + \frac{dN}{\partial q_n} \Delta q_n + \frac{dN}{\partial T} \Delta T \quad (2.30)$$

Учитывая, что $\alpha (T - 293) \ll 1$ [97], можно произвести замену:

$$\frac{\alpha \Delta T}{1 + \alpha (T - 293)} \approx \alpha \Delta T \quad (2.31)$$

Разделив выражение (2.30) на выражение (2.26) и учитывая (2.31), выведем выражение относительной стабильности результирующего параметра ФСИС:

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta N}{N} &= \sum_{i=1}^m \frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} \left(\frac{\Delta q_i}{q_i} + \alpha_i \Delta T \right) = \\
&= \frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} \frac{\Delta q_i}{q_i} + \\
&+ \sum_{i=1}^m \frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} \alpha_i \Delta T,
\end{aligned} \tag{2.32}$$

где α_i – ТК –ого параметра СК;

$$\Delta T = (T - 293) \text{ К.}$$

Второе слагаемое правой части уравнения (2.32) представляет собой формулу температурной стабильности результирующего параметра ФСИС:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} \alpha_i \right] \Delta T, \tag{2.33}$$

где $\frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} = B_i$ – коэффициенты весомости.

Исходя из вышеописанного, исследование ФСИС с точки зрения температурной стабильности, заключается в поиске температурных коэффициентов результирующего параметра ФСИС. Самостоятельной задачей является определение коэффициентов весомости B_i , в целях их нахождения можно воспользоваться эмпирическими методиками.

2.6 Уравнение температурной стабильности. Практическая значимость при проектировании светодиодных приборов

Необходимо отметить тот факт, что выражение для температурной стабильности (2.33) не отличается высокой практической значимостью при разработке термостабильных ФСИС.

В диссертации Алексева В.П. впервые представлен способ определения коэффициентов весомости B_i «для выражении температурной стабильности (2.33) с помощью статистического планирования проведения эксперимента вместе с регрессионным анализом» [100]. По итогу эксперимента, вышеописанное уравнение регрессии принимает следующий вид:

$$\bar{N} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i q_i + \sum_{i<j}^k b_{ij} q_i q_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} q_i^2 + \dots, \quad (2.34)$$

где \bar{N} – анализ генерального значения результирующего параметра N ;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – экспериментальные коэффициенты уравнения регрессии, которые представляют собой анализ генеральных коэффициентов.

Составление уравнения регрессии (2.34), а также оценка адекватности этого выражения, требуют применение базовых принципов теории планирования и проведения факторного эксперимента. Проектирование эксперимента обычно подразумевает применение нормировочного фактора:

$$Q_i = \frac{q_i(T - T_0)}{|q_i(T - T_0)|}, \quad Q_i \equiv \pm 1, \quad (2.35)$$

где $(T - T_0) = \Delta T$ – интервал варьирования.

Проведение факторного эксперимента вида 2^k реализуется за счёт двухуровневого варьирования всех факторов. Когда проведено соотнесение столбцу матрицы проектирования эксперимента в кодовом виде подходящего коэффициента многочлена, запишем:

$$\bar{N} = B_0 Q_0 + \sum_{i=1}^k B_i Q_i + \sum_{i<j}^k B_{ij} Q_i Q_j + \sum_{i=1}^k B_{ii} Q_i^2 + \dots \quad (2.36)$$

Посредством нормировочного фактора (2.35) можно произвести замещение многочлена (2.36) выражением с единицами исчисления неизвестных (2.34) в натуральном виде. После чего, используя метод дифференцирования последовательно по каждому отдельному фактору, имеем выражение температурной стабильности:

$$\frac{\Delta N}{N} = \left[\sum_{i=1}^k A_i \alpha q_i + \sum_{i<j}^k A_{ij} \alpha q_i \alpha q_j + \sum_{i=1}^k A_{ii} (\alpha q_i)^2 + \dots \right] \Delta T \quad (2.37)$$

где $A_i = \frac{\partial N}{\partial q_1} \frac{q_{i0}}{n_0}$ – коэффициент весомости линейных членов;

$A_{ij} = \frac{\partial^2 N}{\partial^2 q_1} \frac{q_{i0}^2}{n_0}$ – интегрированный коэффициент весомости второго порядка, определяющий тепловое влияние $(i-j)$ факторов на результирующий параметр.

$A_{ii} = \frac{\partial^2 N}{\partial^2 q_1} \frac{q_{i0}^2}{n_0}$ – коэффициент весомости второго порядка.

Последовательность действий при использовании метода статистического проектирования эксперимента показана Рисунком 2.11.



Рисунок 2.11 – Общий алгоритм определения коэффициентов весоности, базирующийся на проектировании эксперимента

Придерживаясь алгоритма проектирования эксперимента с многопараметрическими электрорадиоэлементами (в данной работе это СК), предлагается изменять вместо значений термозависимых характеристик, температуру СК ΔT_i . Подобная замена позволяет записать выражение температурной стабильности следующим образом:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^k a_i \frac{\Delta T_i}{T_i} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_i a_j \frac{\Delta T_i}{T_i} \frac{\Delta T_j}{T_j} + \dots \quad (2.38)$$

где $a_i = \frac{b_i \cdot T_0}{\Delta T \cdot b_0}$ – коэффициент весоности i -ого СК;

T_0 - номинальная температура (нулевой уровень варьирования);

ΔT – интервал варьирования температуры;

$\frac{\Delta T_i}{T_i}$ – относительная стабильность рабочей температуры СК.

Сопоставляя полученное выражение (2.38) с исходным выражением для температурной стабильности (2.33), можно сделать вывод: ограничения, рассмотренные ранее, такие как: низкая информативность, идентичность рабочих температур СК, линейность функции, - абсолютно не свойственны выражению (2.38). Следовательно, выражение для температурной погрешности (2.38) можно признать подходящей математической моделью в решении задач температурной стабильности разрабатываемых ФСИС.

2.7 Использование вычислительных методов моделирования тепловых режимов

Для сокращения сложности, а также уменьшения экономических издержек при проведении факторного эксперимента, авторы работы [99] описали подход, который в настоящее время широко применяется. Его суть заключается в применении вычислительного эксперимента вместо физического эксперимента. Следует отметить, что главная сложность в проведении вычислительного эксперимента заключается в построении достоверного математического образа [100]. В связи с тем, что факторный эксперимент, а также связанные с ним вычислительные процессы, максимально формализован, весь спектр автоматизированных процессов можно свести к дискретным алгоритмическим моделям. Рассматривая вышеописанное выражение, определяющее температурную стабильность, можно подчеркнуть:

- Алгоритмическую модель оценки схемотехнических решений с целью определения коэффициентов весомости в выражении температурной погрешности устройства:

- Алгоритмическую модель разработки топологии, характеризующую температурное поле [101], а также определяющую относительную стабильность ТР СК.

Привлекательность описанного метода к системной разработке термостабильных ФСИС можно объяснить такими ключевыми свойствами как: существенное снижение экономических и временных затрат в период предварительной организации разработки и запуска серийного изготовления, рациональным определением способа обеспечения термостабилизации, и, в итоге, снижение технико-экономических параметров затрат при производстве.

Такой системный подход, направленный на обеспечение температурной стабильности ФСИС, в рамках настоящей работы апробирован при исследовании методом компьютерного моделирования. Определенные этапы подобного подхода широко используются в современном мире, например, в трудах [102 –104]. Моделирование проводилось с целью снижения температурного градиента вдоль главной оси ФСНМ, другими словами, для выпрямления температурного профиля. В качестве ПО для моделирования был выбран программный пакет Autodesk Simulation CFD. Начальный конструктивный вариант ФСНМ насчитывал 20 СК, обладающих мощностью тепловыделения 0,012 Вт (Рисунок 2.12, график *a*), подробнее процесс компьютерного моделирования описан в Главе 3. Проведенное моделирование позволило вычислить коэффициенты влияния a_i (сведены в таблицу 2.1), а также записать экспериментальный вид выражения температурной стабильности (2.39). В целях адекватного восприятия в формуле (2.39) в явном виде приведены всего шесть слагаемых.

Таблица 2.1 – Коэффициенты влияния уравнения температурной стабильности

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
-0,983	-0,637	-0,384	-0,173	–	-0,002	–	–	-0,0003	–
				0,047		0,001	0,0005		0,0003
a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{20}
0,0002	0,0003	0,0007	0,0009	0,002	0,05	0,214	0,438	0,663	0,815

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = -0,983 \frac{\Delta T_1}{T_1} - 0,637 \frac{\Delta T_2}{T_2} - \dots - 0,0003 \frac{\Delta T_{10}}{T_{10}} + 0,0002 \frac{\Delta T_{11}}{T_{11}} + \dots$$

$$\dots + 0,663 \frac{\Delta T_{19}}{T_{19}} + 0,815 \frac{\Delta T_{20}}{T_{20}} .$$
(2.39)

Выражение (2.39) предоставляет возможность количественно определить требования к координатам размещения СК на ОСН ФСНМ с целью минимизации

величины $\frac{\Delta\eta}{\eta}$. Рассматривая результаты в таблице 2.1 и выражение (2.39), можно

отметить, что минимизация значения $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ осуществима при соблюдении следующих условий:

- повышения стабильности ТР СК:

$$\frac{\Delta T_i}{T_i} \rightarrow 0 ,$$
(2.40)

- взаимная термокомпенсация i -ых и j -ых СК с почти равными по модулю, но с разным знаком, коэффициенты весомости a_i и a_j :

$$|a_i| \approx |a_j| ; a_i \approx -a_j .$$
(2.41)

Компьютерное моделирование позволило доказать адекватность предложенной идеи. Вариант стандартной конструкции ФСНМ, в котором СК установ-

лены на ОСН равноудаленно (Рисунок 2.12, график *a*), характеризуется стабильностью значения светового выхода на уровне 83 % $\left(\frac{\Delta\eta}{\eta} = -0,17\right)$. Использование метода топологической термокомпенсации, представленной на Рисунке 2.12, график *б*, в выражении (2.39), другими словами применение (2.40) и (2.41) при математическом моделировании повышает стабильность итогового значения светового выхода вплоть до 91 % $\left(\frac{\Delta\eta}{\eta} = -0,09\right)$.

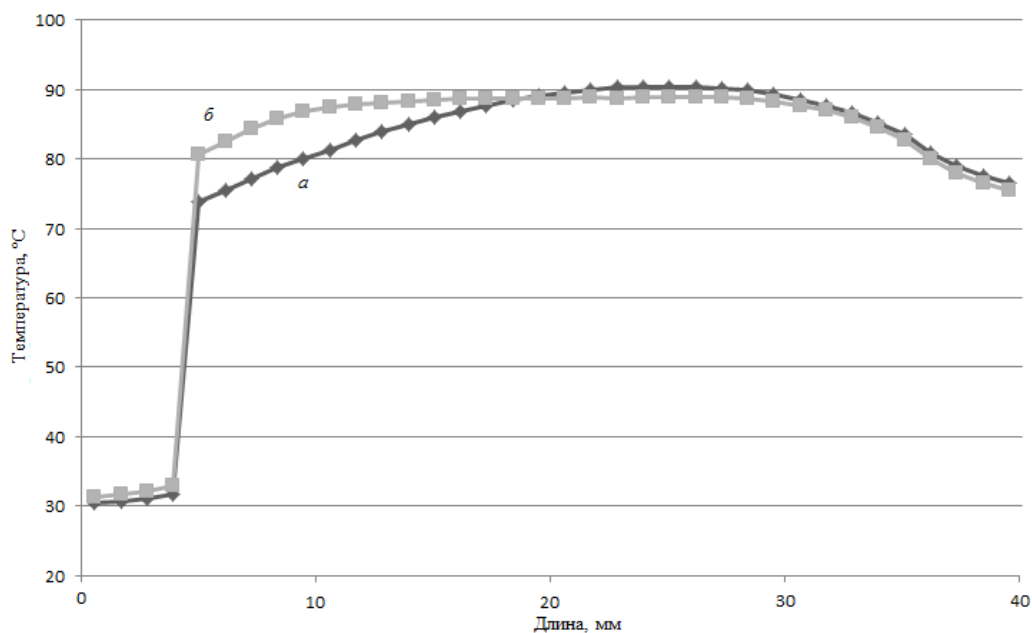


Рисунок 2.12 – Температурный профиль ФСНМ (а) до и (б)

после применения термокомпенсации, 20 шт. СК мощностью 0,012 Вт

Исходя из вышеописанного, следует, что в результате работы получен алгоритмический образ, базирующийся на выполнении вычислительного факторного эксперимента для определения выражения температурной погрешности посредством программного пакета Simulation CFD от компании Autodesk. Адекватность алго-

ритмического образа доказана в результате исследования температурной стабильности основных параметров ФСИС. Обнаружено, что наибольшее значение в обеспечении температурной стабильности таких параметров как, световой выход и КЦТ ФСИС, имеет относительная стабильность ТР СК. Использование алгоритмической модели, представленной на Рисунке 2.11, можно рекомендовать при системном подходе к разработке термостабильных радиоэлектронных приборов в качестве адекватного способа термостабилизации.

3 Результаты и обсуждение полученных результатов

3.1 Результаты компьютерного моделирования зависимости температурного режима от количества ФСНМ

В начале исследования ТР ФСИС посредством САЕ-технологий строится объёмная твердотельная модель. Проектирование нити осуществлялось по аутентичной конструкторской документации с соблюдением особенностей реальных ФСИС, в том числе внутренних элементов конструкции, изготовленных специально для проведения серии факторных экспериментов. В процессе моделирования сборки ФСИС применена трёхмерная модель ФСНМ мощностью 1Вт, которая была спроектирована ранее [105]. Модель ФСНМ показана на Рисунке 3.1.

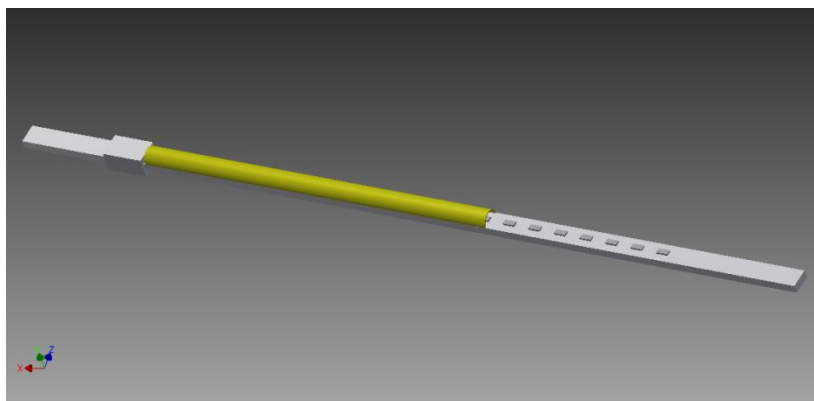


Рисунок 3.1 – Внешний вид модели светоизлучающего элемента

Для определения общего вида температурного поля также разработаны 3D-модели ФСИС с двумя, тремя, четырьмя, и шестью светоизлучающими элементами. Внешний вид компьютерной геометрической модели ФСИС с двумя и шестью светоизлучающими элементами представлены на Рисунке 3.2 и Рисунке 3.3 соответственно.

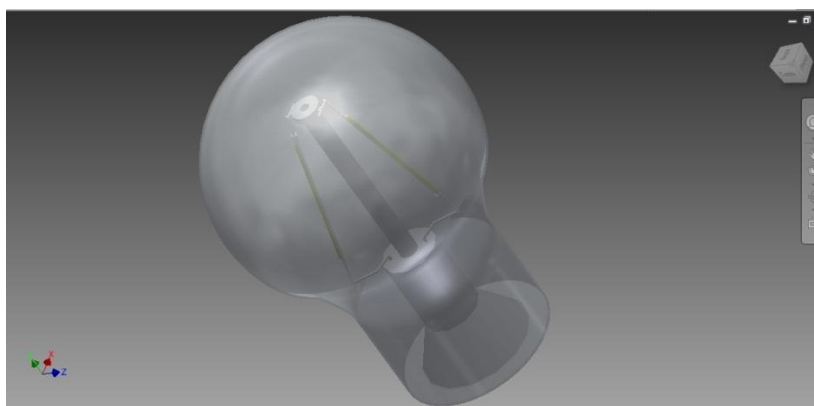


Рисунок 3.2 – Внешний вид модели ФСИС с двумя светоизлучающими элементами

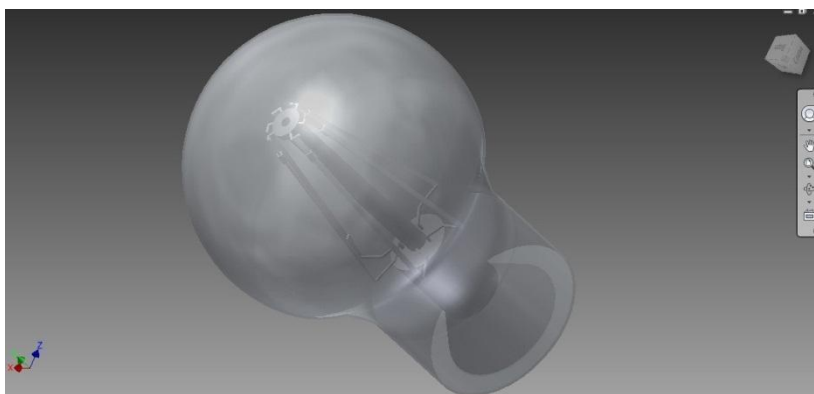


Рисунок 3.3 – Внешний вид модели ФСИС с шестью светоизлучающими элементами

Для определения ТР ФСНМ геометрические модели, спроектированные ранее, переносятся в программный комплекс моделирования процессов гидрогазодинамики Simulation CFD от компании Autodesk. В данном комплексе далее указываются характеристики материалов, краевые условия, размер сетки, требуемый для адекватного анализа МКЭ, а также параметры естественной конвекции, ориентация в пространстве и др. Более детальное представление фундаментальных принципов, на которых основывается программный пакет Simulation CFD, изложено ранее в работе [106] в процессе исследования в рамках настоящей работы.

На данном этапе работы основной задачей исследования являлось установление числа ФСНМ, при котором в ФСИС будет поддерживаться допустимый ТР.

С этой целью реализовано моделирование ФСИС с двумя, тремя, четырьмя, и шестью ФСНМ. Результаты моделирования представлены ниже на Рисунках 3.4 – 3.7, на них приведены температурные поля, а также векторы направления движения потоков газа.

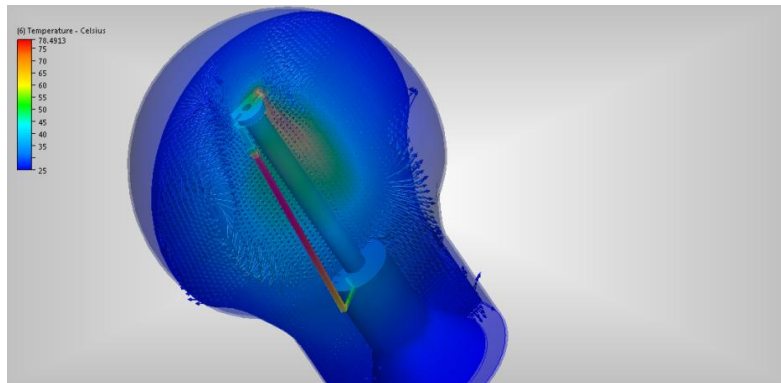


Рисунок 3.4 – Лампа с двумя светоизлучающими элементами

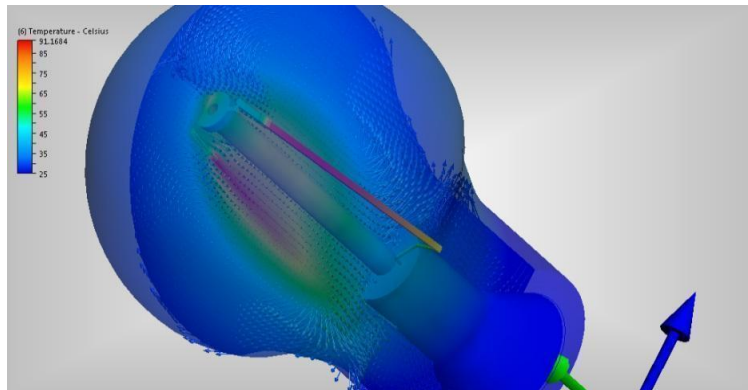


Рисунок 3.5 – Лампа с тремя светоизлучающими элементами

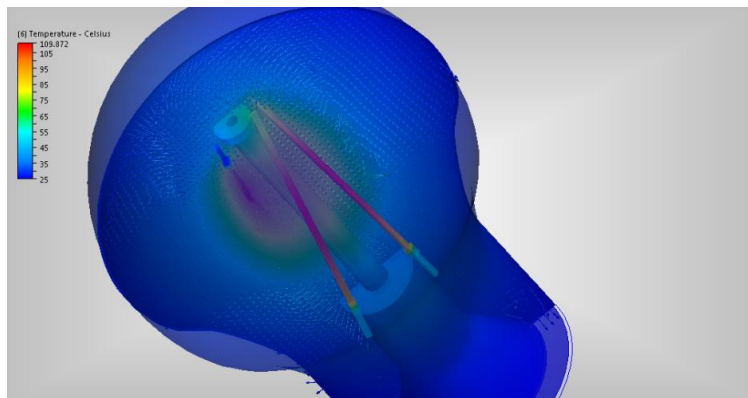


Рисунок 3.6 – Лампа с четырьмя светоизлучающими элементами

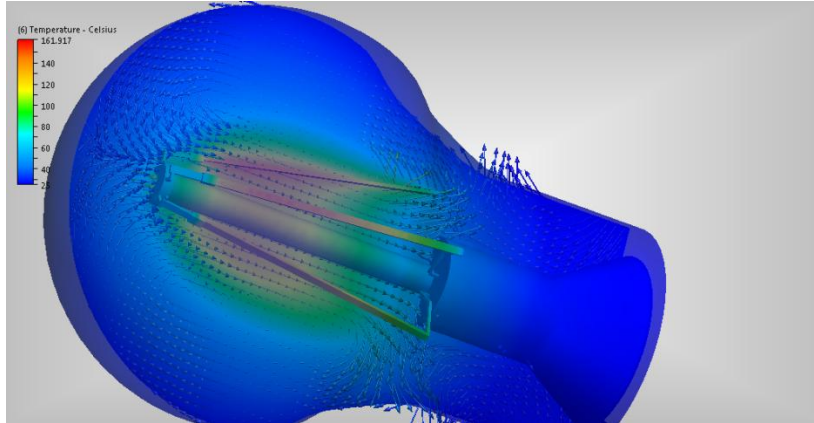


Рисунок 3.7 – Лампа с шестью светоизлучающими элементами

Оценивая полученные результаты, сведенные в таблицу 3.1, можно сделать заключение: увеличение количества ФСНМ ведет к нелинейному повышению температуры внутри ФСИС, а в связи с тем, что предельная рекомендованная рабочая температура находится в районе 110 °С [107–108], можно сделать вывод, что максимальное количество ФСНМ равняется 4 для исследуемой колбы А55

Таблица 3.1 – Максимальные температуры ФСИС

Количество светоизлучающих элементов, шт.	Максимальное значение температуры линейки, °С
2	78,5
3	91,17
4	109,87

3.2 Результаты исследования зависимости теплового режима и светового потока ФСИС от газового наполнения колбы

Охлаждение светоизлучающих элементов осуществляется за счёт естественной конвекции внутри герметичной стеклянной колбы. Для определения наиболее подходящей газовой среды для наполнения колбы ФСИС было проведено трёхмерное компьютерное моделирование [109]. Для подтверждения результатов моделирования изготовлены экспериментальные образцы ФСИС с наполнением следующими газами: воздух, азот, гелий.

В процессе моделирования, в первую очередь, построена трёхмерная геометрическая модель ФСИС. Построение модели выполнено в программе Autodesk Inventor 2015 (лицензия для учебных заведений). Модель представляет собой стеклянную колбу А55 с размещенной внутри неё опорной конструкцией и четырьмя светоизлучающими элементами. Также, в качестве окружающей среды, вокруг модели ФСИС построен куб со стороной 1 метр [110]. Далее модель импортирована в программное обеспечение для моделирования гидрогазодинамических и теплофизических процессов Autodesk Simulation CFD 2015 (лицензия для учебных заведений). Данная система предназначена для решения задач гидрогазодинамики и подробно рассмотрена выше. При проведении моделирования сделаны следующие допущения:

- не моделируется цоколь ФСИС;
- окружающая лампу среда – воздух, температура 25°C, объём 1 м³;
- не учитывается перенос тепловой энергии за счёт радиации.

Тепловая мощность, генерируемая каждым светоизлучающим элементом, составляет 0,6 Вт. Температура всей системы в начальный период времени 25 °С. Результаты моделирования сведены в таблицу 3.2. На Рисунке 3.8 приведены результаты расчёта трёхмерной компьютерной модели ФСИС с гелием.

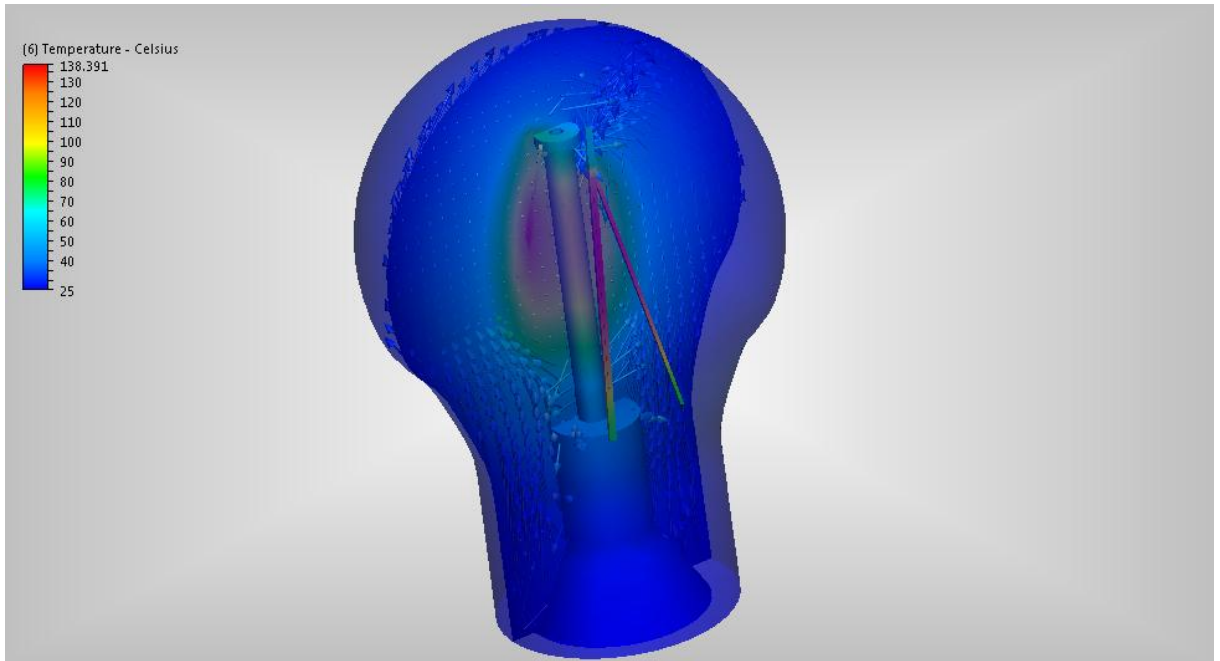


Рисунок 3.8 – Температурное поле и векторы движения потоков газа ФСИС с гелием

Таблица 3.2 – Значение расчётной максимальной температуры в зависимости от газового наполнения по результатам компьютерного моделирования

№	Газ	Максимальная температура, °С
1	Воздух	371,68
2	Азот	368,66
3	Гелий	138,39

Для подтверждения экспериментальных данных были изготовлены экспериментальные образцы ФСИС [111], которые полностью идентичны, за исключением газового наполнения колбы. Всего изготовлено шесть образцов - по два образца для каждого газа. В силу того, что измерение температуры внутри герметичной стеклянной колбы представляется как весьма непростая задача, оценка температурного режима произведена косвенно, по световому потоку. Как было указано выше, световой поток зависит от температуры *p-n*-перехода светодиода и снижается при превышении определенного порогового значения, разного для раз-

ных светодиодов и находящегося в районе 110 °С. Внешний вид экспериментального образца ФСИС с конвекционным газовым охлаждением приведен на Рисунок 3.9. Результаты измерений сведены в таблицу 3.3.



Рисунок 3.9 – Внешний вид ФСИС

Таблица 3.3 – Значение светового потока в зависимости от газового наполнения по результатам эксперимента

№ образца	Газ	Световой поток, лм
1	Воздух	340±10%
2		340±10%
3	Азот	348±10%
4		350±10%
5	Гелий	400±10%
6		385±10%

По итогам выполненной работы, обобщая результаты моделирования и экспериментальных исследований, можно сделать следующий вывод: для улучшения теплового режима ФСИС и повышения светового потока в качестве газонаполнителя, целесообразно использовать гелий.

3.3 Экспериментальное исследование зависимости температурного режима ФСНМ от толщины и материала основания

Для определения качественной характеристики теплового режима ФСНМ реализован компьютерный факторный анализ, базирующийся на МКЭ. Суть метода состоит в замещении объекта исследования множеством подобластей, для которых индивидуально рассчитываются процессы теплообмена, более подробно метод рассмотрен в главе 2 настоящей работы. С результатами моделирования можно ознакомиться в работе [112]. Анализируя данные, полученные в вышеупомянутой работе, можно сделать вывод о целесообразности изготовления экспериментальных образцов ФСНМ с ОСН, выполненным из алюминия, с увеличенной толщиной [113]. Изготовлено два экспериментальных образца: образец № 1 – нить с сечением ОСН 2×1 мм из алюминия, образец № 2 – нить с сечением ОСН 2×2 мм из алюминия. На Рисунке 3.10 представлен внешний вид образца №1.

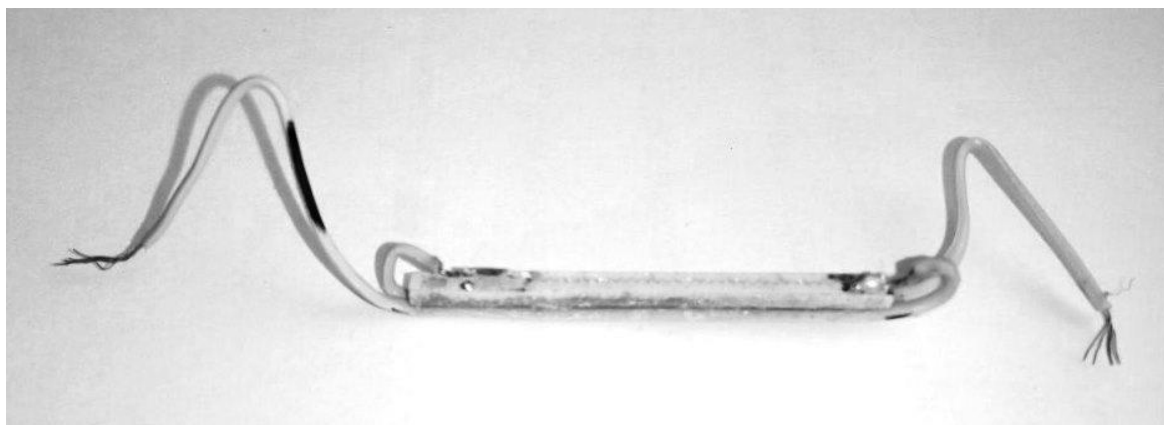


Рисунок 3.10 – Внешний вид экспериментального образца нити сечением 2×1 мм

Описание эксперимента

Экспериментальная установка представляет собой экспериментальный образец 1, удерживающее устройство 2, на котором закреплены выводы лабораторного ИП 3, вольтметр 4, амперметр 5, экран 6, препятствующий случайному перемещению воздушных масс [114], и закрепленную на штативе тепловизионную камеру 7. Структурная схема экспериментальной установки представлена на Рисунке 3.11.

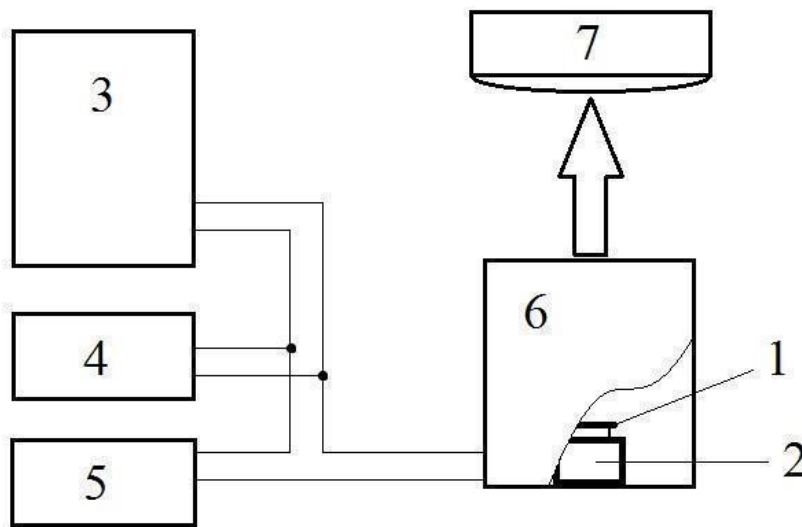


Рисунок 3.11 – Структурная схема экспериментальной установки

Методика измерений следующая: после установки испытуемого образца в удерживающее устройство подавалось напряжение на образец. При измерениях использовалась стабилизация по потребляемому току, значения которого представлены в таблице 3.4. После подачи напряжения температура образца начинала возрастать, и одновременно возрастал потребляемый ток, в связи с этим на протяжении времени разогрева осуществлялась ручная подстройка величины потребляемого тока. Измерения теплового поля фиксировались с частотой два кадра в секунду. После смены экспериментального образца ограниченный объем продувался потоком свежего воздуха для обеспечения одинаковых начальных условий.

Таблица 3.4 – Значения максимальных температур ОСН

№	Площадь сечения, мм	Ток, мА	Электрическая мощность, Вт	Максимальная температура, °С
1	2×1	10	0,76	69,77
2	2×2	9	0,068	55,75
3		10	0,757	64,42
4		20	1,542	116,92
5		25	1,935	138,66
6		50	3,9	267,39

На Рисунке 3.12 представлена фотография, полученная с помощью тепловизионной камеры. На фотографии указаны три точки, для которых на Рисунке 3.13 представлена динамика разогрева ОСН.

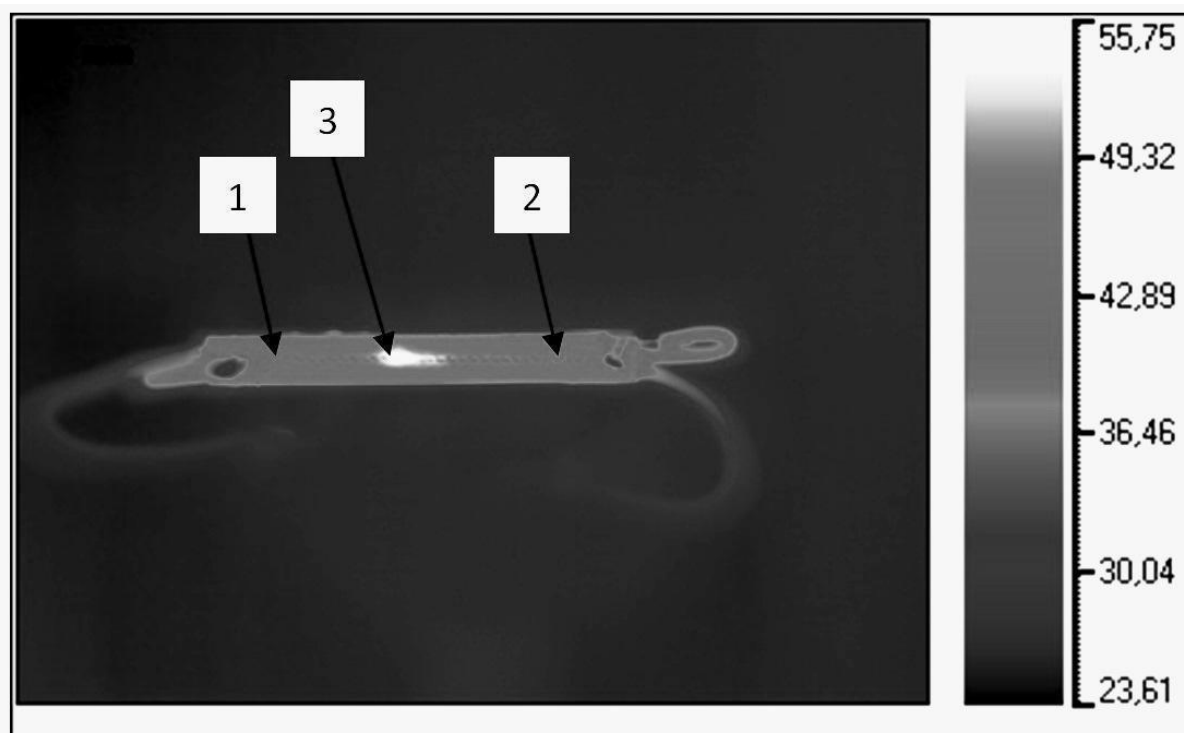


Рисунок 3.12 – Температурное поле ФСНМ сечением 2×2 мм

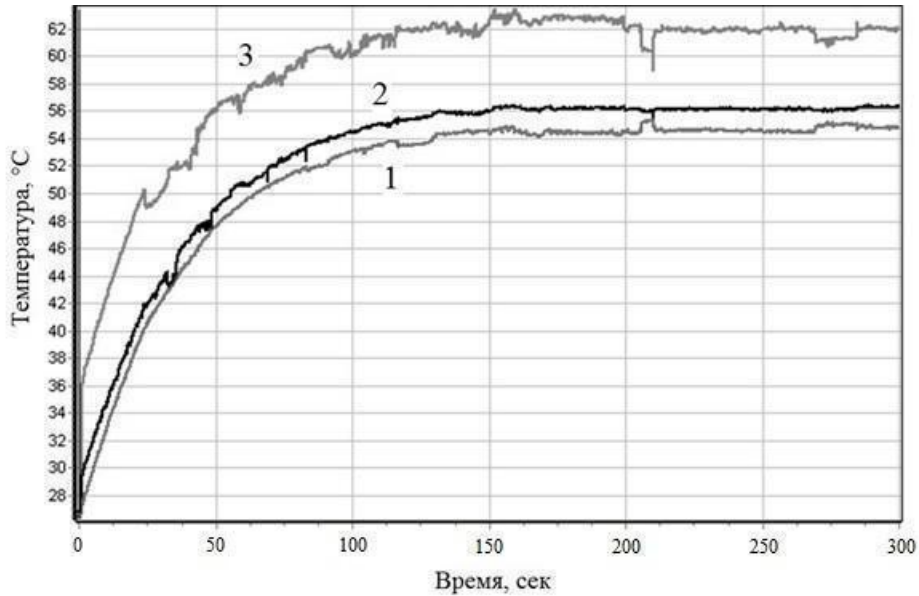


Рисунок 3.13 – Динамика разогрева ФСНМ

Особый интерес представляет пространственное распределение температур ОСН, так как разные рабочие температуры СК оказывают прямое воздействие на снижение светового выхода [115]. На Рисунке 3.14 представлен график распределения температур вдоль ОСН, причем длина дана в относительных единицах, соответствующих пикселям изображения, полученного с помощью тепловизионной камеры.

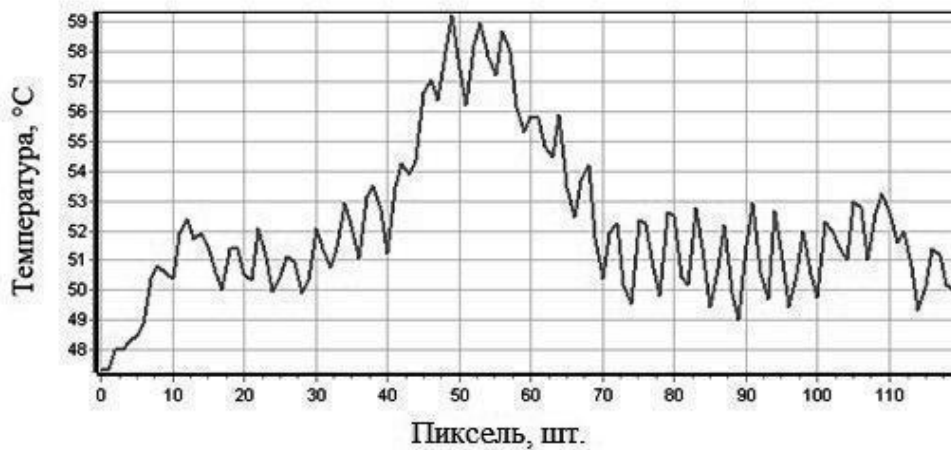


Рисунок 3.14 – Пространственное распределение температур вдоль линии ОСН

Данные в таблице 3.4 позволяют судить о полезном эффекте [116], полученном за счет использования алюминия в качестве материала ОСН. В статье [117] представлены экспериментальные данные по измерению ФСНМ с ОСН, изготовленным из монокристаллического сапфира (оптический лейкосапфир Al_2O_3). При аналогичном расположении и количестве СК эффективный теплоотвод предложенного варианта исполнения ОСН позволяет повысить потребляемую электрическую мощность до 1,542 Вт при такой же температуре ФСНМ. Следовательно, повышается коэффициент полезного действия ФСНМ и основные потребительские параметры, такие как световой поток и др. Связано это с тем, что ФСНМ рассчитаны на ток около 80 мА, однако, при использовании традиционной конструкции ФСНМ, этот показатель ограничен на уровне 10 мА из-за ограничений рабочей температуры.

График на Рисунке 3.13 говорит о том, что ФСНМ с алюминиевым ОСН в воздушной атмосфере выходит на рабочую температуру за 2,5 минуты. Неравномерность графика обусловлена ручной подстройкой ИП.

На Рисунке 3.14 отчетливо наблюдается область повышенной концентрации тепла в середине ФСНМ, также эту область можно наблюдать на Рисунке 3.13. Данная область обусловлена расположением СК – ИТЭ. Подобная проблема подробно описана в [114].

Таким образом, использование алюминиевого ОСН в конструкции светоизлучающего элемента позволяет значительно повысить основные показатели ФСНМ и ФСИС с конвекционным газовым охлаждением в частности.

3.4 Результаты исследования зависимости температурного режима ФСНМ от толщины, конструкции и материала основания

На основе предыдущих исследований была выявлена тенденция к снижению максимальной температуры ФСНМ и конструкции в целом при увеличении толщины ОСН. В связи с чем было решено определить температурные режимы при разных толщинах начиная от 420 мкм (толщина ОСН зарубежного аналога) и

изменяя толщину в сторону увеличения до предполагаемого предела технологических возможностей, т.к. изготовление ОСН из стали толщиной порядка 2 мм представляется затруднительным процессом. Также известно, что алюминий обладает более высокой теплопроводностью, меньшей массой и большей податливостью к механической обработке, при этом сравнительно невысокой стоимостью [118]. При производстве радиоаппаратуры для более эффективного теплоотвода от элементов, подверженных перегреву, используются различного типа радиаторы. Радиатор предназначен для увеличения эффективной поверхности рассеяния тепловой энергии [119]. На основе вышеописанного, возникло предположение, что увеличив площадь рассеяния, можно снизить температуру ФСНМ и, тем самым, улучшить температурный режим всей конструкции.

С целью проверки описанных в предыдущем пункте предположений был проведен компьютерный анализ модели ФСНМ. Модель представляет собой некоторый объем гелия, имитирующий свободную атмосферу (т.е. неограниченный объем), внутрь этого объема помещена ФСНМ. Конструкция стандартного ФСНМ представлена на Рисунке 3.1. На металлическом ОСН расположено 20 СК с габаритами 585x260x90 мкм и мощностью 0,05 Вт каждый. Геометрическое твердотельное трёхмерное моделирование выполнено в системе автоматизированного проектирования Autodesk Inventor 2015.

Первым шагом в исследовании было определение температурного режима исходной линейки с ОСН, выполненным из никелированной стали толщиной 420 мкм. Следующим шагом – увеличение толщины в два раза, т.е. толщина ОСН составит 840 мкм, затем увеличение до 2 мм. Также, с целью определения зависимости максимальной температуры [120] и распределения температурного поля ФСНМ от эффективной площади рассеяния тепловой энергии, была построена модель, представленная на Рисунке 3.15. Толщина ОСН составляет 2 мм, параметры рёбер: количество 28 шт., толщина 0,5 мм, высота 1,5 мм, частота следования 1 мм. Благодаря такой конструкции удалось увеличить площадь ОСН с 214 мм² до 257,5 мм².

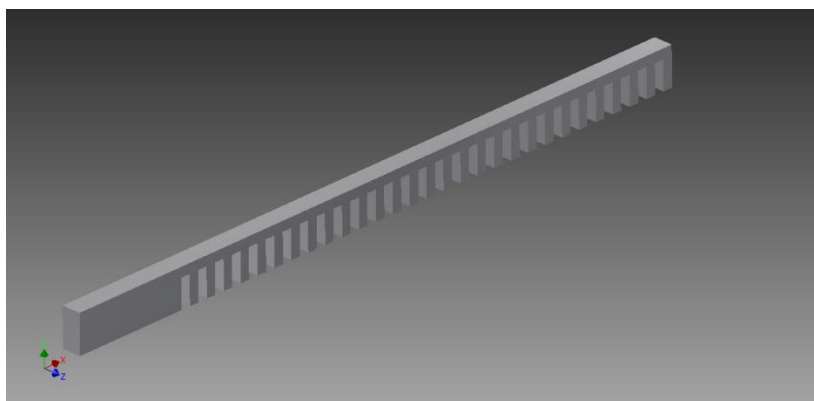


Рисунок 3.15 – ОСН с увеличенной площадью поверхности

На этапе инженерного расчета реализована возможность изменения материала ОСН, для каждой конструкции было выбрано два материала – никелированная сталь и алюминий. Увеличение площади засчет создания рёбер на ОСН анализировалось только при толщине ОСН 2 мм в силу того, что изготовление при меньших толщинах представляется затруднительной технологической задачей. Максимальные температуры подложек с различными геометрическими параметрами приведены в таблице 3.4. На Рисунке 3.16 изображено распределение температурного поля ФСНМ для случаев, соответствующих пунктам таблицы 3.5.

Таблица 3.5 – Изменения температуры ФСНМ

№	Геометрические параметры, толщина ОСН	Максимальное значение температуры линейки, °С (изменение, %)	
		Никелированная сталь	Алюминий
1	Исходная линейка, 420 мкм	118 (0%)	108,7 (-7,9%)
2	Исходная линейка, 840 мкм	104 (-11,9%)	96,7 (-18%)
3	Исходная линейка, 2 мм	90,5 (-23,3%)	85,6 (-27,4%)
4	Линейка с увеличенной площадью, 2 мм	101 (-14%)	93,2 (-21%)

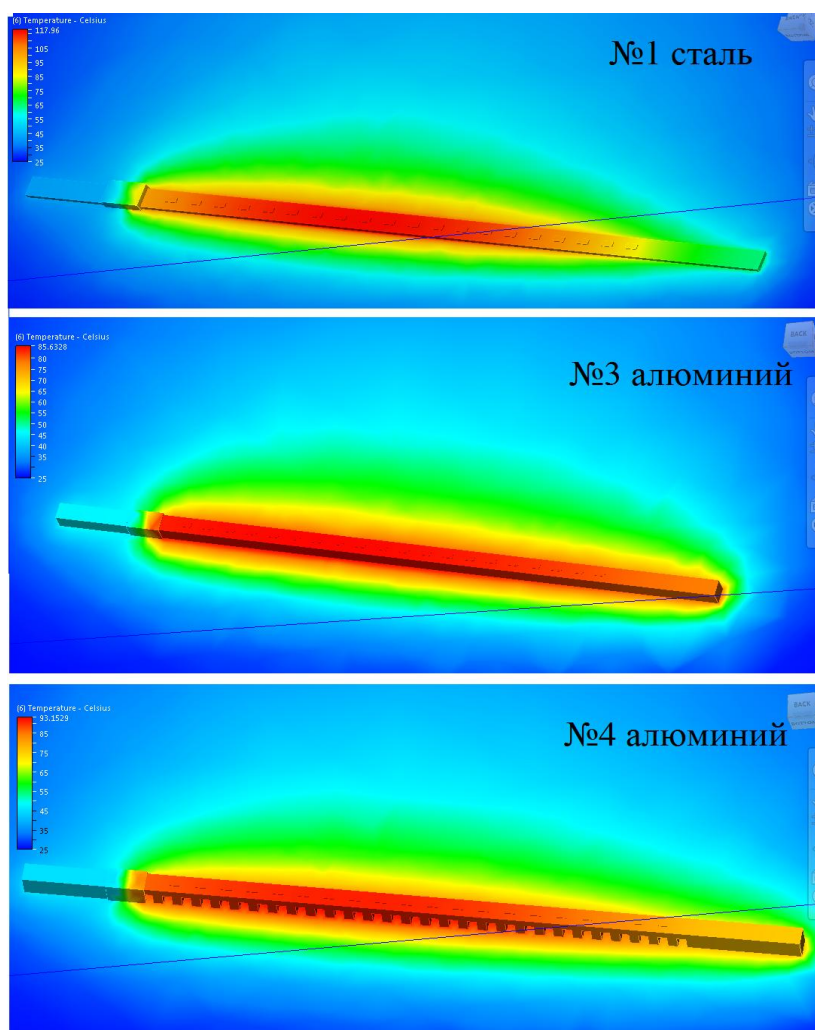


Рисунок 3.16 – Распределение температурного поля

Анализируя полученные результаты, которые сведены в таблицу 3.5, можно сделать следующий вывод: при увеличении толщины металлической ОСН максимальная температура убывает по линейному закону. Также необходимо отметить, что использование в качестве материала ОСН алюминий, позволяет снизить максимальную температуру, тем самым улучшить температурный режим при любых толщинах и конфигурациях. Так, увеличив толщину ОСН до 2 мм и используя алюминий, можно снизить максимальную температуру ФСНМ на 27,4%.

При увеличении эффективной поверхности рассеяния тепловой энергии ОСН наблюдается отрицательный эффект, т.е. вместо ожидаемого снижения температуры, относительно ОСН с такой же толщиной, температура повысилась на 11,6 % для стали и на 8,84% для алюминия. Такой результат можно объяснить

тем, что при естественной конвекции большую роль играет изменение объёма, а не площади поверхности. В нашем случае, при создании рёбер для увеличения площади, объем ОСН уменьшился с 70 мм^3 до $48,25 \text{ мм}^3$, что и повлияло на изменение температуры в сторону увеличения.

Для снижения температуры ФСНМ рекомендуется в качестве материала ОСН использовать алюминий, а также увеличить толщину ОСН до максимальных значений, ограниченных технологическими возможностями и экономическими показателями. Также возможна разработка вариантов конструкции, позволяющих обеспечить более эффективный теплоотвод от СК.

3.5 Результаты экспериментальных исследований образцов, изготовленных с применением одномерной топологической термокомпенсации

Экспериментальные данные получены с помощью специально разработанной измерительного стенда, структурная схема которого приведена на Рисунке 3.17. Основной частью измерительного стенда является герметичная и прозрачная в видимом диапазоне камера. Замкнутый объём камеры предназначен для создания условий, максимально схожих с условиями реального режима работы ФСНМ внутри стеклянной ФСИС. Также, как и в реальной ФСИС для повышения эффективности конвективного теплообмена между ФСНМ и внешней средой, камера наполняется гелием. Поступление гелия в камеру контролируется клапаном. Питание исследуемых образцов ФСНМ подается через коммутирующее устройство от импульсного источника тока *Mastech HY6003E – 3* и отслеживается с помощью мультиметра *Mastech MAS838*. Применяемый ИП характеризуется малыми пульсациями тока и плавной установкой выходных параметров. Применяемый цифровой мультиметр отличается универсальностью, компактными размерами, может совершать до трёх измерений в секунду. Внешний вид установки представлен на Рисунке 3.18.

Рабочая температура СК измеряется бесконтактным методом – с помощью тепловизора FLIR SC7700M. Тепловизор предназначен для научных исследований и обладает следующими основными характеристиками:

- тип детектора – кадмий/ртуть/теллур (КРТ или МСТ);
- разрешение – 640x512 пикселей;
- спектральный диапазон – 1.5...5.1 мкм;
- чувствительность, эквивалентная шуму – 25 мК.



Рисунок 3.17 – Структурная схема измерительной установки

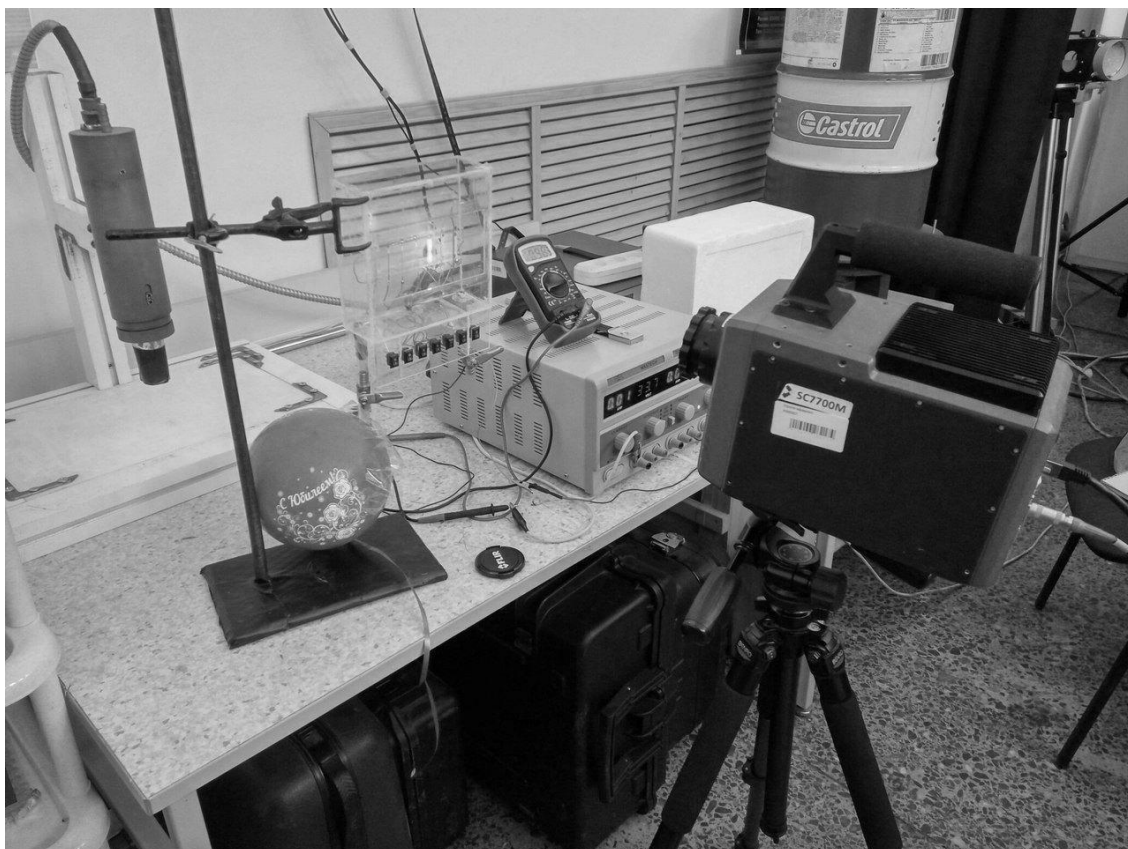


Рисунок 3.18 – Внешний вид экспериментальной установки

Сборочная единица ФСНМ представлена на Рисунке 3.19. ОСН из никелированной стали. Металлическое ОСН используется как общий контакт для СК. Одним из контактов СК привариваются к тыльной стороне ОСН (общий проводник). На лицевой стороне ОСН монтируются 28 СК на клей с высоким показателем тепло- и электропроводности и последовательно подключаются с помощью проволочного проводника к второму контакту ФСНМ.

Применяемые *Epistar ES – CEBHV10F* способны работать при значении прямого тока до 20 мА и имеют спектр излучения в диапазоне от 465 до 475 нм. Максимальная температура *p-n* перехода таких СК – 115°С.

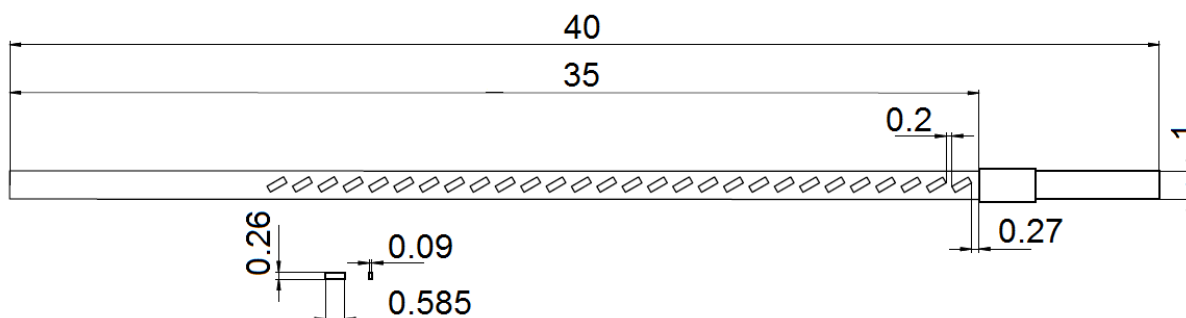


Рисунок 3.19 – Конструктивные и установочные размеры ФСНМ

Рассмотрим условия проведения эксперимента. На первом этапе производится откачка воздуха из герметичной камеры. Далее в камеру подаётся технический гелий (99,8%) из резервуара. Давление газа при этом составляет около 1 атм. ИП поддерживает заданное значение тока в интервале от 1 до 5 мА. Фиксирование значений прямого тока через ФСНМ осуществляется мультиметром. Коммутирующее устройство поочередно подключает испытуемые ФСНМ к источнику тока.

В стационарном тепловом режиме, спустя пять минут после подключения ИП к испытуемому образцу, происходит регистрация температурного профиля ФСНМ с помощью тепловизора. Температура окружающей среды 18 °С. В онлайн режиме производится полнокадровая тепловизионная видеофиксация с частотой 380 Гц. Данные поступают на персональный компьютер с разрядностью 14 бит по технологии Gigabit Ethernet. Программное обеспечение Altair, поставляемое с тепловизором, позволяет сохранять термограммы на персональном компьютере в распространенных графических форматах.

В процессе эксперимента было исследовано три образца ФСНМ:

- образец № 1: прямой ток $I = 5$ мА, эквидистантное расположение СК ($Coeff = 1,0$);
- образец № 2: прямой ток $I = 5$ мА, эквидистантное расположение СК ($Coeff = 1,0$);
- образец № 3: прямой ток $I = 5$ мА, локализация СК ($Coeff = 1,5$).



Рисунок 3.20 – Температурное поле ФСНМ с люминофорным покрытием

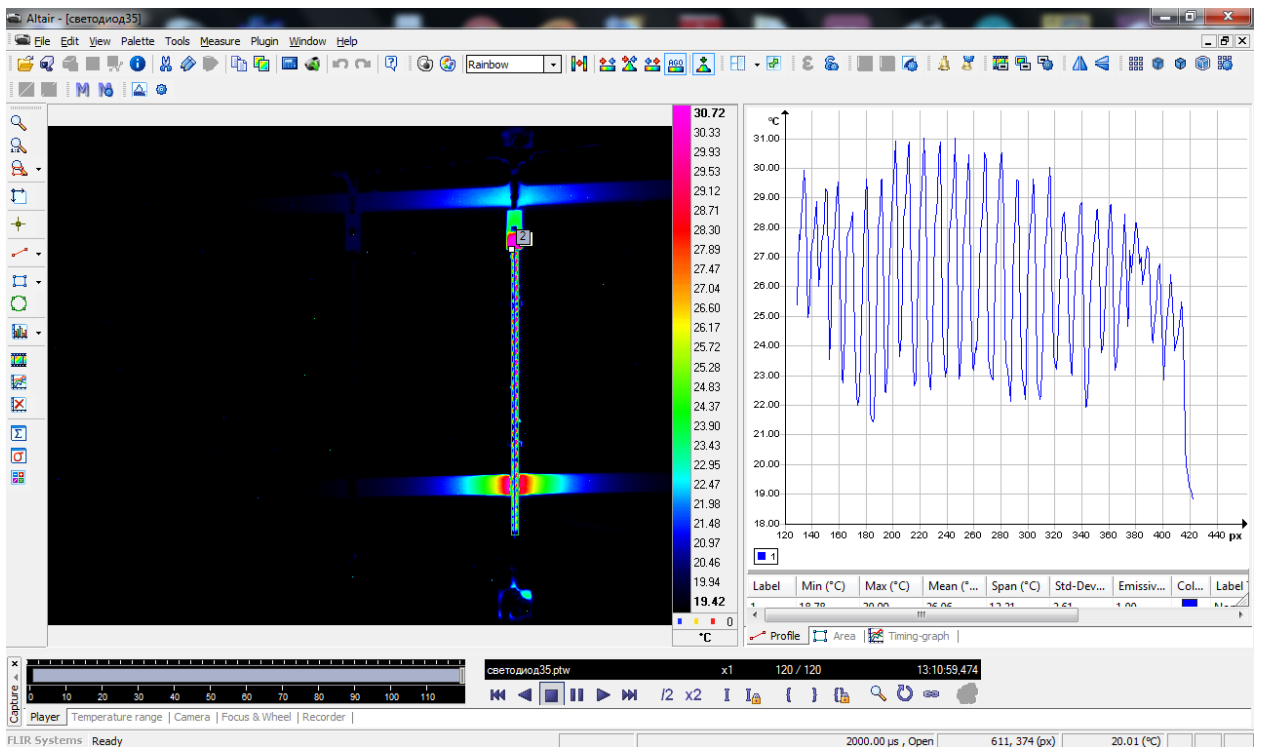
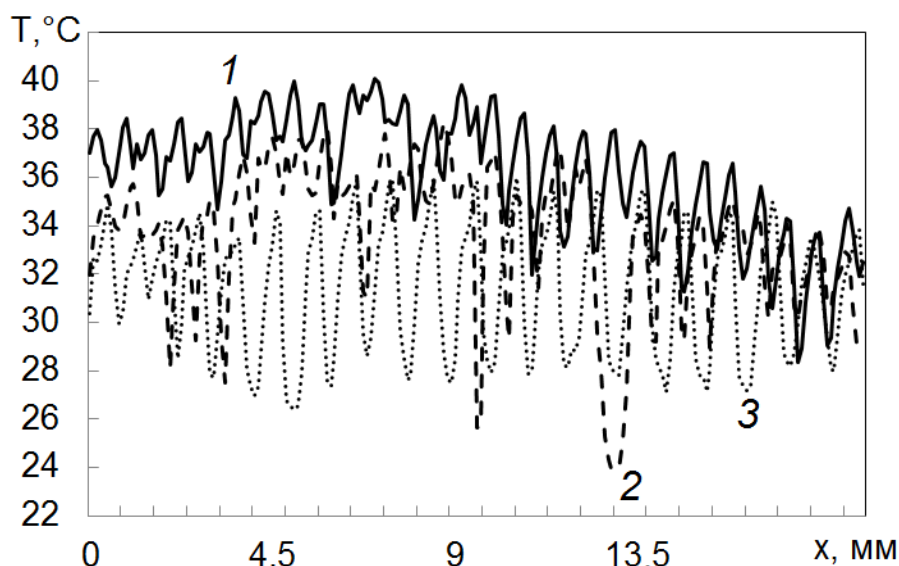


Рисунок 3.21 – Температурный профиль ФСНМ без люминофорного покрытия

Высокая разрешающая способность тепловизора во временном и пространственном диапазоне позволяет наблюдать мгновенные пульсации температур относительно постоянной составляющей температурного профиля (Рисунок 3.20). Количество пульсаций на каждом графике температурного профиля, а также их координаты, соотносится с количеством и расположением СК, размещенных на

ОСН. Наблюдаемый эффект пульсации температур согласуется с математической моделью (2.4) сосредоточенного распределения плотности теплового потока в сборочной единице. Усредненная амплитуда пульсаций по каждому образцу:

$$T_m^1 = 1,7^\circ\text{C}; T_m^2 = 2,5^\circ\text{C}; T_m^3 = 3,9^\circ\text{C}. \quad (3.1)$$



Кривая 1 – $I = 5$ мА, $Coeff = 1,0$; кривая 2 – $I = 5$ мА, $Coeff = 1,0$; кривая 3 – $I = 5$ мА, $Coeff = 1,5$.

Рисунок 3.22 – Температурные профили образцов филаментных СД нитей

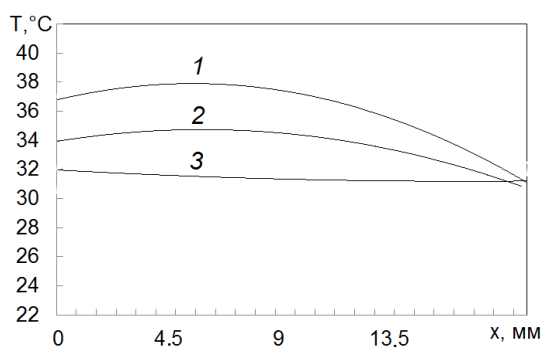
Анализ зависимостей на Рисунке 3.20 совместно с числовыми значениями (3.1) позволяет утверждать: рост постоянной составляющей температурного профиля $T_{п.с}$ обратно пропорционален амплитуде пульсации T_m СК, принадлежащих этому профилю:

$$T_{п.с} \sim \frac{1}{T_m}.$$

Наибольшие пульсации температуры для образца №3 являются следствием неэквидистантным размещением СК ($Coeff = 1,5$). Следует отметить (Рисунок 3.20, кривая 3), в центре рассматриваемой области, совпадающем с местом с

наиболее редким расположением СК на ОСН, амплитуда пульсаций больше, чем на периферии. Отметим, что, несмотря на увеличение амплитуды пульсаций для образца № 3, достигается положительный эффект плоского температурного профиля (2.10) по сравнению с образцами № 1 и № 2.

В целях повышения визуальной убедительности реализации (2.10), исходное изображение температурных профилей вдоль главной оси ОСН трех экспериментальных образцов (Рисунок 3.20), модифицировано посредством аппроксимации полиномами второго порядка (Рисунок 3.21).



Кривая 1 $T(x) = -3 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,037x + 36,754$;

кривая 2 $T(x) = -2 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,0248x + 33,913$;

кривая 3 $T(x) = 2 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0085x + 31,968$.

Рисунок 3.23 – Аппроксимация температурных профилей полиномами второго порядка

Также были измерены температурные зависимости ФСНМ. Установлено, что при изменении температуры от 0 °C до 90 °C вольт-амперная характеристика сдвигается в сторону уменьшения напряжения. Разница в напряжении между крайними значениями температуры составляет 3 В (Рисунок 3.24). Яркость ФСНМ снижается на 11%, доминирующая длина волны при фиксированном прямом токе ФСНМ линейно возрастает от 451 до 456 нм.

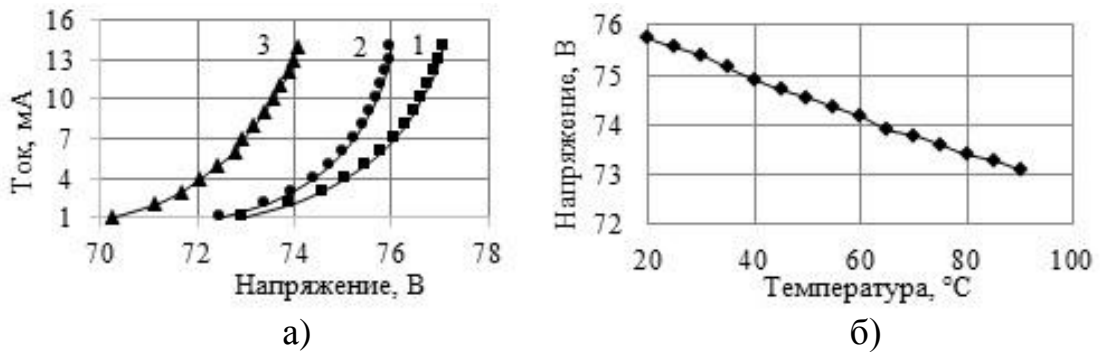


Рисунок 3.24 – ВАХ при разных значениях температуры (а) и температурная зависимость напряжения при значении прямого тока 10 мА (б).

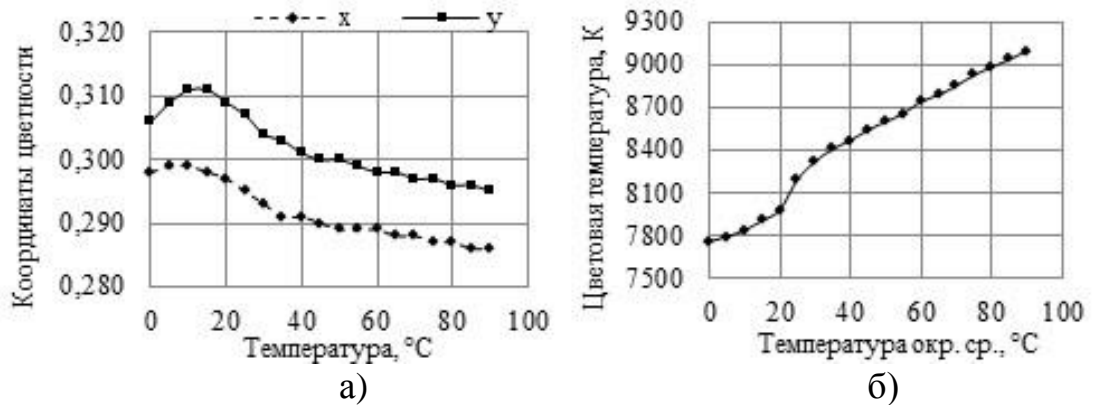


Рисунок 3.25 – Зависимость цветковых координат (а) и коррелированной цветовой температуры (б) от температуры окружающей среды.

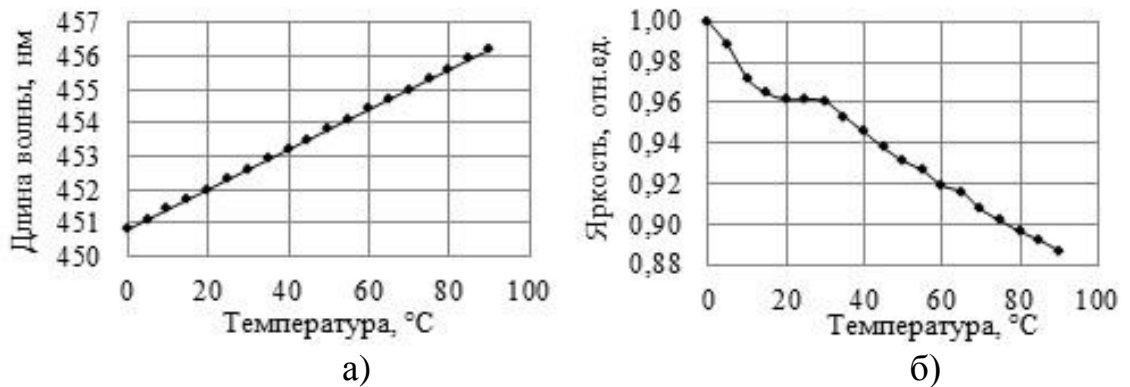


Рисунок 3.26 – Температурная зависимость доминирующей длины волны (а) и температурная зависимость яркости (б) при значении прямого тока 10 мА.

Рассматривая результаты аппроксимации в качественном плане, наибольшей равномерностью температурного профиля обладает образец №3, с неэквидистантной расстановкой СК ($Coef = 1,5$). Наиболее оптимальный показатель

$Coeff = 1,5$ по величине среднеквадратического отклонения выявлен по результатам нескольких факторных вычислительных экспериментов. Кроме минимальной кривизны, график 3 ещё обладает минимальной постоянной составляющей температурного профиля $T_{п.с} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты количественной оценки исследуемых образцов представлены в таблице 3.6. Также рассчитана кривизна в характерной точке $x = 9$ мм, которая практически совпадает с центром рабочего участка ФСНМ. Применение неравномерного расположения СК для образца №3 позволило уменьшить кривизну температурного профиля на порядок (с 10^{-4} до 10^{-5} единиц). Следовательно, для образца №3 экспериментально решена поставленная задача – найдено геометрическое место СК на ОСН с целью повышения равномерности температурного профиля в области точки $x = 9$ мм.

Таблица 3.6 – Кривизна температурного профиля ФСНМ

№ образца	Описание образца	Аппроксимация полиномом второго порядка	Кривизна в точке $x = 9$ мм
1	Ток $I = 5$ мА, коэффициент дихотомии $Coeff = 1,0$	$T(x) = -3 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,037x + 36,754$	$5,991 \cdot 10^{-4}$
2	Ток $I = 5$ мА, коэффициент дихотомии $Coeff = 1,0$	$T(x) = -2 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,0248x + 33,913$	$3,997 \cdot 10^{-4}$
3	Ток $I = 5$ мА, коэффициент дихотомии $Coeff = 1,5$	$T(x) = 2 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0085x + 31,968$	$4,000 \cdot 10^{-5}$

Заключение

1. На основе анализа экспериментальных данных показано, что в стационарном тепловом режиме в ФСНМ возникает градиент температуры вдоль длины ОСН – температурный профиль. Градиент температуры возникает по следующим основным причинам: а) конечное значение коэффициента теплопроводности ОСН (в зависимости от материала $\lambda = 15 \dots 30$ Вт/(м·К)); б) неодинаковыми граничными условиями теплообмена применительно к каждой грани ОСН; в) сосредоточенным расположением ИТЭ на ОСН.

2. Доказано, что при увеличении эффективной поверхности рассеяния тепловой энергии ОСН, наблюдается отрицательный эффект, т.е. вместо ожидаемого снижения температуры, относительно ОСН с такой же толщиной, температура повысилась на 11,6 % для стали и на 8,84 % для алюминия. Такой результат можно объяснить тем, что при естественной конвекции большую роль играет изменение объёма, а не площади поверхности. В нашем случае, при создании рёбер для увеличения площади объем ОСН уменьшился с 70 мм^3 до $48,25 \text{ мм}^3$, что и повлияло на изменение температуры в сторону увеличения [121].

3. Показано, что сосредоточенные ИТЭ на ОСН формируют температурные пульсации относительно постоянной составляющей температурного профиля. Амплитуда температурных пульсаций T_m находится в обратно пропорциональной зависимости с уровнем постоянной составляющей $T_{п.с}$ температурного профиля

$$T_{п.с} \sim \frac{1}{T_m}.$$

4. Анализ отечественных и зарубежных научных работ позволяет утверждать, что наличие неплоского температурного профиля в ФСНМ, т.е. наличие различных рабочих температур СК, приводит к нестабильности световых характеристик ФСНМ. В частности, отмечается температурная нестабильность светового потока $I(T)$ и цветовой температуры $T_c(T)$.

5. На основе предложенной математической модели процесса теплопередачи для ОСН с N точечными ИТЭ введено понятие функции локализации для

одномерного случая неравномерного распределения СК вдоль длины ОСН. Доказано, что функция локализации зависит от аргумента i (порядковый номер СК) и от параметра $Coeff$ (коэффициент дихотомии). Математически показано, что семейство функций локализации, отличающихся коэффициентом дихотомии, принадлежит к классу гипербол

$y = a + \frac{b}{c-x}$. Физический смысл коэффициентов гиперболы – это взаимосвязь граничных координат ОСН; количества размещаемых СК; заданного коэффициента дихотомии.

6. Сформулирован критерий оценки применимости функции локализации вдоль длины ОСН – минимизация кривизны K для характерной точки профиля x : $Loc(x_i) \square_{K(x) \rightarrow 0}$. Доказано, что существует некоторое значение коэффициента дихотомии $Coeff$, как параметра функции локализации, при котором для характерной точки x температурного профиля кривизна $K \rightarrow 0$.

7. Проведено экспериментальное исследование трех образцов ФСНМ, из которых два образца имеют эквидистантное расположение СК, а третий образец обладает локализацией СК с коэффициентом дихотомии $Coeff = 1.5$. Результаты экспериментальных исследований позволяют утверждать: применение локализации СК с коэффициентом дихотомии $Coeff = 1.5$ для образца №3 позволило уменьшить кривизну температурного профиля на порядок по сравнению с образцами №1 и №2 (с 10^{-4} до 10^{-5} единиц).

1. Предложенный способ одномерной топологической термокомпенсации ФСНМ позволяет улучшить стабильность световых характеристик ФСНМ за счет минимизации кривизны температурного профиля [122].

Список сокращений

СД – светоизлучающий диод

СК – светодиодный кристалл

ФСНМ – филаментный светодиодный нитевидный модуль

ФСИС – филаментная светодиодная лампа

ОСН – основание светодиодной нити

ИС – источник света

ПП – полупроводник

ИП – источник питания

ИТЭ – источник тепловой энергии

ТР – тепловой режим

ПО – программное обеспечение

МКР – метод конечных разностей

МКЭ – метод конечных элементов

КТК – коэффициент теплоотдачи конвекцией

ЭРЭ – электрорадиоэлемент

ДУ – дифференциальное уравнение

ЭВМ – электронная вычислительная машина

АМ – аналитический метод

Список литературы

1. Шуберт Ф. Светодиоды: пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – Изд. 2-е. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
2. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 210 с.
3. Дадонов В.А. Анализ развития и современного состояния рынка светотехники / В.А. Дадонов, А.А. Бондарь. – М: МГТУ, 2014. – С. 1–13.
4. Игумнов В.Н. Физические основы микроэлектроники: учеб. пособие. – М. – Берлин: Директ-Медиа, 2014. – 358 с.
5. Берг А. Светодиоды: пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича / А. Берг, П. Дин. - М.: Мир, 1979. – 686 с.
6. Классификация источников света [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/lighting/166-klassifikacija-istochnikov-sveta.-chast.html>, свободный (дата обращения: 18.03.2015).
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов, в 2-х книгах. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
8. Плазменные светильники – перспективные устройства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.energsovet.ru/bul/15_2011.pdf, свободный (дата обращения: 08.09.2015).
9. Плазменные осветительные устройства на основе СВЧ-разряда / О.Ю. Александрова, С.М. Бондаренко, Э.И. Гутцайт, Р.А. Жидков // Т-СОММ: Телекоммуникации и транспорт (Москва). – 2013. Т. 7, № 9. – С. 9-11.
10. Гавриленко А.А. Плазменные лампы / А.А. Гавриленко, Я.А. Кунгс. – Красноярск: Вестник Красноярского государственного университета, 2014. – С. 221–225.

11. Плазменные светильники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.axiomasveta.com/info/plazmennye-svetilniki/>, свободный (дата обращения: 13.12.2015).
12. Lightning the way: Perspectives on the global lightning market [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/automotive%20and%20assembly/lighting_the_way_perspectives_on_global_lighting_market_2012.ashx, свободный (дата обращения: 23.12.2015).
13. Перспективы мирового применения светодиодов в освещении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gisee.ru/articles/energy-tools/24558/>, свободный (дата обращения: 12.02.2016).
14. Устройство светодиода и принцип действия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://led-lampu.ru/ustrojstvo-svetodioda-i-princip-dejstviya.html>, свободный (дата обращения: 18.03.2016).
15. О.В. Лосев и пути развития Русской микроэлектроники в XXI веке / С.А. Гилёв, М.А. Новиков, А.А. Потапов, А.Э. Рассадин // Нелинейный мир. Радиотехника (Москва). – 2015. Т. 13, № 4. – С. 4-11.
16. Никифоров С.Г. Проблемы, теория и реальность светодиодов // Компоненты и технологии. – СПб.: Файнстрит. – 2005. -№5. – С. 176 – 185.
17. Спектры люминесценции, эффективность и цветовые характеристики светодиодов белого свечения на основе р-п-гетероструктур InGaN/GaN, покрытых люминофорами / М.Л. Бадгутдинов, Е.В. Коробов, Ф.А. Лукьянов, А.Э. Юнович // Физика и техника полупроводников. - 2006. - №6 (40). – С. 758 – 763.
18. Valkirov N. Study of high-power COB LED modules with respect to topology of chips / N. Valkirov, A. Andonova, N. Kafadarova. – Eger: IEEE, 2015. – P. 108–113.
19. Преимущества и перспективы применения светодиодов в искусственном освещении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ledgo.ru/led_preimuzhestva/, свободный (дата обращения: 15.04.2016).

20. Развитие и перспективы развития российского рынка светодиодных систем освещения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://nitron-led.ru/articles/razvitie_i_perspektivy_rossijskogo_rynka_svetodiodnyh_sistem/, свободный (дата обращения: 22.04.2016).
21. Hecht J. Changing the lights. Are LEDs ready to become the market standard? // *OPN Optics & Photonics News*. – 2012. – V. 45. – P. 46–50.
22. Современные технологии освещения: вперед в будущее [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pravda.ru/navigator/sovremennye-tehnologii-osveshchenija.html>, свободный (дата обращения: 28.05.2016).
23. «Retrofit LED»: актуальное состояние рынка и перспективы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lta.ru/index.php/publikatsii/33-retrofit-led-aktualnoe-sostoyanie-rynka-i-perspektivy>, свободный (дата обращения: 05.06.2016).
24. Progress in LED technology for solid-state lighting / J. Bhardwaj, G. Guth, J.M. Cesaratto, O.B. Shchekin, W.A. Soer, W. Götz, R. Bonné, Z.F. Song, J. den Breejen // *SPIE. Digital Library (San Francisco)*. – 2017. – V. 1024. – P. 135–141.
25. Plessey acquires CamGaN to commercialize gallium-nitride-on-silicon LEDs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16559872/plessey-acquires-camgan-to-commercialize-galliumnitrideonsilicon-leds>, свободный (дата обращения: 26.06.2018).
26. Direct wafer bonding of GaN-SiC for high power GaN-on-SiC devices / F. Mu, W. Yougan, H. Ran, S. Tadatomo // *Materialia (Paris)* – 2018. – V. 3. – P. 12–14.
27. Peters L. AC-LED lighting products find niche, perhaps more // *LEDs Magazine*. – 2014. – V. 6. – P. 13–21.
28. Bush S. Native green LEDs from gallium-nitride-on-silicon // *Electronics Weekly. Plessey Semiconductors*. – 2019. V. 2. P. 8–9.

29. Сенченко В.А. Входной контроль параметров освещенности рабочих мест с персональными компьютерами / В.А. Сенченко, Е.А. Глумов, Д.А. Шаймарданов. – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2017. – С. 235–241.
30. Walerczyk S. Human centric lighting // Architectural SSL. -2012. – V. 6. – P. 20–26.
31. 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: STT, 2016 [– 562 с.] – С. 540–541.
32. Нестеркина Н.П. Сравнительные исследования филаментных светодиодных ламп мощностью 4 Вт в колбах А50 И А60 / Н.П. Нестеркина, А.С. Кондрашин, А.А. Корсуков. – Пенза: Наука и просвещение, 2016. – С. 14–21.
33. Нестеркина Н.П. Исследование светодиодных филаментных ламп в колбе В35 / Н.П. Нестеркина, Р.К. Равилова. – Саранск: НИ МГУ имени Н.П. Огарева, 2017. – С. 502–508.
34. Никифоров С. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты. Оптоэлектроника. – 2005. – № 5. – С. 16–24.
35. Лёгкий В.Н. Оптоэлектронные элементы и устройства систем специального назначения: учеб. для ВУЗов / В.Н. Лёгкий, Б.В. Галун, О.В. Санков. – Новосибирск: НГТУ, 2011. – 455 с.
36. Поль А. Преимущества использования 0,5-Вт светодиодов // Светодиоды, светодиодные кластеры и сборки. – 2010. – № 4. – С. 14–16.
37. Thermal analysis of COB array soldered on heat sink / F. He, Q. Chen, Ju. Liu, Ji. Liu // International communications in heat and mass transfer. – 2014. – V. 59. – P. 55–60.
38. Рожанский И.В. Анализ причин падения эффективности электролюминесценции светодиодных гетроструктур AlGaInN при большой плотности тока накачки / И.В. Рожанский, Д.А. Закгейм. – СПб: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2006. – С. 861–867.

39. Миранович В. Мощные светодиоды: Особенности применения, проблемы и методы решения / В. Миранович, И. Филоненко // Электронные компоненты. – 2007. – № 6. – С. 45–49.
40. Wu H.H. A study on the heat dissipation of high power multi-chip COB LEDs / H.H. Wu, K.H. Lin, S.T. Lin. – Taipei: Taiwan, 2012. – P. 280–287.
41. Ying S.P. Thermal analysis of high-power multichip COB light-emitting diodes with different chip sizes / S.P. Ying, W.B. Shen. – Hsinchu: Taiwan, 2015. – P. 896–901.
42. He L. Light extraction analysis of high-power LED based on flip chip technology / L. He, L. Ye. – Beijing: China, 2014. – P. 771–774.
43. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов / Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – 215 с.
44. Гончарова Ю.С. Тепловой режим полупроводниковых источников света при ускоренных испытаниях на надёжность и долговечность / Диссертация на соискания учёной степени кандидата технических наук. – 2016. – 145 с.
45. Analysis of junction temperature and modification of luminous flux degradation for white LEDs in a thermal accelerated reliability test / H.L. Ke, L. Jing, J. Hao, Q. Gao, Y. Wang, X.X. Wang, Q. Sun, Z.J. Xu. – Washington: IEEE, 2016. – V. 55, No. 22. – 5909 p.
46. Ежов В. Стандартизация и расчёт тепловых характеристик мощных светодиодов // Электронные компоненты. Светотехника и оптоэлектроника. – 2009. – С. 42–48.
47. Poppe A. On the standardization of thermal characterization of LEDs / A. Poppe, C.J.M. Lasance. – San Jose: IEEE, 2009. – 151 p.
48. Effect of thermal conduction path deficiency on thermal properties of LEDs package / K.B. Abdelmlek, Z. Araoud, R. Ghnay, K. Abderrazak, K. Charrada, G. Zissis. – 2016. – P. 2–22.
49. Comparative analysis of parameters counterflow heat exchanger, prepared according to method of computer fluid dynamics and practical design method of heat

exchange apparatus / A.V. Zharov, A.A. Pavlov, V.V. Vlasov, V.S. Favstov, R.V. Gorshkov // Fundamental research (Moscow). – 2013. – No. 11. – P. 423–429.

50. Lee T.T. Application of CFD Technology to Electronic Thermal Management / T.T. Lee, B. Chambers, M. Mahalingam. – Tempe: IEEE, 1995. – P. 511–520.

51. Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий: учебн. пособие / В.С. Солдаткин, А.А. Вилисов, В.И. Туев, Д.Г. Старосек. – Томск.: Томский университет систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 48 с.

52. Дульнев Г.Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г.Н. Дульнев, Э.М. Семяшкин. – Л.: Энергия, 1968. – 360 с.

53. Mohiuddin I. Computational fluid dynamics application tools / I. Mohiuddin, H. Mathkour. – Hammamet: IEEE, 2016. – P. 1–5.

54. Kennedy D.P. Spreading resistance in cylindrical semiconductor devices // J. Appl. Phys. – 1960. - № 31. – P. 1490–1497.

55. Лабунцов В.А. Тиристоры. Технический справочник. – Изд. 2-е, доп. – М.: Энергия, 1964. – 561 с.

56. Юренев В.Н. Теплотехнический справочник / В.Н. Юренев, П.Д. Лебедев. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.

57. Давидов П.Д. К теории инженерного расчёта нестационарных тепловых процессов в мощных полупроводниковых приборах // Электричество. – 1966. – С. 46–52.

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

59. Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: ТПУ. – 2007. – 172 с.

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

61. Алексеев В.П. Трёхмерное моделирование регулирования температуры подложки в гибридно-плёночном микротермостате // Новые исследования в разработке техники и технологий. – 2018. – № 1. – С. 12–30.
62. Petroski J. Spacing of high-brightness LEDs on metal substrate PCB`s for proper thermal performance // Inter society conference on thermal phenomena. – 2004. – P. 507–514.
63. Potential thermally conductive alumina filled epoxy composite for thermal management of high power LEDs / P. Anithambigai¹, M.K. Dheepan Chakravarthii, D. Mutharasu, L.H. Huong, T. Zahner, D. Lacey, I. Kamarulazizi // J Mater Sci: Mater Electron (New York). – 2016.
64. Lee C.K. Thermal analysis of LED lamp with LTCC-COB package / C.K. Lee, J.K. Ahn. – Bengley: Emerald Group Publishing, 2013. – P. 3–9.
65. Development and Characterization of Optimum Heat Sink for 30 W Chip on Board LED Down-Light / B.S. Seo, K.J. Lee, J.K. Yang, Y.S. Cho, D.H. Park // Transactions on electrical and electronic materials (Seoul). – 2012. – P. 292–296.
66. LED's luminous flux lifetime prediction using a hybrid numerical approach / K. Kijkanjanapaiboon, T.W. Kretschmer, L. Chen, X. Fan, J. Zhou // 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (Budapest). – 2015. – P. 1–8.
67. Petroski J. Range and probabilities of LED junction temperature predictions based upon forward voltage population statistics // 31st Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM). – 2015. – P. 327–331.
68. Barbosa J.L.F. High power LED luminaire design optimization / J.L.F. Barbosa, W.P. Calixto, D. Simon. – Florance: IEEE. – 2016. – P. 1–6.
69. Thermal analysis of a nano-pore silicon-based substrate using a YAG phosphor supported COB packaged LED module / Z. Chuluunbaatar, C. Wang, E.S. Kim, N.Y. Kim // International Journal of Thermal Sciences (Paris). – 2014. V. 86. – P. 307–313.

70. Новое поколение источников света [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://inni.info/novost/novoye-pokoleniye-istochnikov-sveta>, свободный (дата обращения: 11.07.2016).
71. Каталог продукции Navigator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://p-el.ru/files/catalogs/catalog%20navigator.pdf>, свободный (дата обращения: 21.06.2019).
72. Васильев А. Технология COB: мифы и реалии // Электротехнический рынок. – 2013. – № 2. – С. 1–5.
73. Simulation and optimization on thermal performance of LED filament light bulb / W. Feng, B. Feng, F. Zhao, B. Shieh, R. Lee // International Communications in Heat and Mass Transfer (London). – 2015. – P. 88–92.
74. Chen X. Thermal analysis for COB based on glass substrate / X. Chen, Y. Wu. – Chengdu: IEEE, 2014. – P. 775–777.
75. New trend in LED: filament bulbs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lbclighting.com/blog/2015/11/new-trend-in-led-filament-bulbs/>, свободный (дата обращения: 30.07.2016).
76. Что такое филаментные лампы Томича (led filament)? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://svetodiodinfo.ru/voprosy-o-svetodiodax/led-filament.html>, свободный (дата обращения: 05.08.2016).
77. Form S-1 registration statement under the securities act of 1933. Semileds corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1333822/000104746910007183/a2199761zs-1a.htm>, свободный (дата обращения: 26.08.2016).
78. High Thermal Stability of Phosphor-Converted White Light-Emitting Diodes Employing Ce: YAG-Doped Glass / J. Wang, C.C. Tsai, W.C. Cheng, M.H. Chen, C.H. Chung, W.H. Cheng // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (Washington). – 2011. – V. 17. – P. 741–746.
79. Сергеев В.А. Нелинейная тепловая модель гетероперехода светодиода / В.А. Сергеев, А.М. Ходаков. – СПб, – 2012. – С. 691–694.

80. Моделирование тепловых процессов в радиаторах, используемых для охлаждения мощных светодиодов / А.Н. Рязанов, И.Ю. Бутусов, С.В. Кузубов, А.В. Кортунюв // Вестник Воронежского государственного технического университета (Воронеж). – 2012. – С. 90–95.
81. Винокуров А. Тепловые режимы мощных светодиодов DORADO // Компоненты и технологии. – 2006. – № 5. – С. 1–4.
82. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена: учеб. пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.
83. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.
84. Biber C. LED light emission as a function of thermal conditions // 24th IEEE SEMI-THERM Symposium. – 2008. – P. 180–184.
85. Старосек Д.Г. Зависимость теплового режима и светового потока светодиодной лампы от газового наполнения колбы / Д.Г. Старосек, А.Ю. Хомяков, К.Н. Афонин. – Томск: НИ ТПУ, 2016 [– 349 с.] – С. 265–267.
86. 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.
87. Petroski J. Thermal challenges facing new generation light emitting diodes (LEDs) for lighting applications // Solid state lighting II. – 2002. –V. 4776. – P. 215–222.
88. Thermal analysis of a package substrate with filling via-holes for COB LED packaging / Y.W. Kim, J.P. Kim, J.B. Kim, M.S. Kim, J.M. Sim, S.B. Song, N. Hwang // Journal of the Korean physical society (Seoul). – 2009. – V. 54, No. 5. – P. 1873–1878.
89. Hu J. Thermal and mechanical analysis of high-power light-emitting diodes with ceramic packages / J. Hu, L. Yang, M.-W. Shin. – Budapest: IEEE, 2007. – P. 77–81.

90. Польш А. Особенности расчёта систем отвода тепла при использовании светодиодов в корпусах PLCC // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 5. – С. 54–57.
91. Озёркин Д.В. Топологическая термокомпенсация светодиодных линейных модулей филаментных ламп / Д.В. Озёркин, Д.Г. Старосек, В.И. Туев. – Томск: Россия, 2018. – С. 156–163.
92. Ельфимов Г.В. Теория переходных кривых. – М.: Трансжелдориздат, 1948. – 312 с.
93. Величко Г.В. О нормировании параметров переходных кривых / Г.В. Величко, П.И. Поспелов, Е.М. Лобанов, В.В. Филиппов // Дороги России XXI века. – 2002. – № 6. – С. 80–86.
94. Левитин А. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. – М.: Вильямс, 2006. – 576 с.
95. Гусев В.П. Расчёт электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры / В.П. Гусев, А.В. Фомин. – М.: Советское радио, 1963. – 368 с.
96. Investigation of temperature regime and luminous flux of light-emitting element of light emitting diode lamp / D.G. Starosek, D.V. Ozerkin, V.I. Tuev, Y.V. Ryapolova, A.U. Olisovec, A.V. Ermolaev // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Islamabad: ARPN, 2015. – P. 6944–6948.
97. Корицкий Ю.В. Справочник по электротехническим материалам. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
98. Алексеев В.П. Стабилизация параметров радиотехнических устройств и систем на основе микростатирования: дис. ... канд. техн. наук. – ТИАСУР. – Томск, 1985. – 214 с.
99. Озёркин Д.В. Анализ и синтез термостабильных радиотехнических устройств: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.17. – ТУСУР, Томск, 2000. – 150 с.
100. Дровосекова Т.И. Разработка компьютерной модели гидrolитосферных процессов // В мире научных открытий. – 2013. – № 2 (38). – С. 177–187.

101. Huang L. Cooling strategy for LED filament bulb utilizing thermal radiation cooling and open slots enhancing thermal convection / L. Huang, Y. Shin, F. Shi. – Las Vegas: IEEE, 2016. – С. 1030–1033.
102. Thermal dissipation enhancement of LED filament bulb by ionic wind / C. Xu, Z. Zhang, J. Chu, J. Wu, X. Lei, H. Zheng, S. Liu // 17th International conference on electronic packaging technology (Harbin). – 2016. – P. 1212–1215.
103. Thermal management of LEDs: package to system / M. Arika, C. Beckerb, S. Weaverb, J. Petroski // Third International Conference on Solid State Lighting (Biligham). – 2004. – P. 64–75.
104. 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.
105. LED Lamp Design Optimizing on Minimum Non-Uniformity of Light Intensity Distribution in Space / K.N. Afonin, A.Y. Olovets, Yu.V. Ryapolova, V.S. Soldatkin, D.G. Starosek, V.I. Tuev, V.G. Hristyukov // 13th International Scientific-Technical Conference APEIE (Novosibirsk). – 2016, V. 1, part 2. – P. 153–156.
106. Dependence on Gas of the Thermal Regime and the Luminous Flux of LED Filament Lamp / D. Starosek, A. Khomyakov, K. Afonin, Yu. Ryapolova, V. Tuev // Proceedings of the XIII International Conference of Students and Young Scientists “Prospects of Fundamental Sciences Development (PFSD-2016)” (Tomsk). – 2016. – P. 060008-1–060008-6.
107. 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.
108. 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. – Т. 310, No. 23. – P. 5143–5146.

109. Старосек Д.Г. Теплопроводность и зависимость теплопроводности от давления газов: гелий, азот, воздух // Научная сессия ТУСУР–2015: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2015. – Ч. 1. – С. 313–316.

110. Nukala S.R. Analysis of Data Center to quantify the performance in terms of Thermal distribution and Air flow using Autodesk Simulation CFD Software // International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering. – 2017. V. 4, iss. 6. – P. 64–71.

111. Разработка энергосберегающей светодиодной лампы на основе светодиодных линеек / А.Ю. Олисовец, Ю.В. Ряполова, А.А. Иванов, Д.Г. Старосек // Материалы 53-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2015: Промышленная электроника (Новосибирск). – 2015. – С. 21.

112. Исследование характеристик образцов светоизлучающих элементов ленточной структуры – светодиодных линеек / А.Ю. Олисовец, Ю.В. Ряполова, А.А. Иванов, Д.Г. Старосек // Материалы 53-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2015: Радиотехника, электроника, связь (Новосибирск). – 2015. – С. 71.

113. Афонин К.Н. Срок службы светодиодных ламп / К.Н. Афонин, Ю.В. Ряполова, Д.Г. Старосек. – Томск: ТПУ, 2016. [– 132 с.] – С. 18–20.

114. Старосек Д.Г. Локальный перегрев светодиодной нити // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. [– 320 с.] – С. 305–307.

115. Park S.J. Thermal performance and orientation effect of an inclined cross-cut cylindrical heat sink for LED light bulbs / S.J. Park, D. Jang, K.S. Lee. – Paris: Elsevier, 2016. – P. 1–7.

116. Миранович В. Мощные светодиоды: Особенности применения, проблемы и методы решения / В. Миранович, И. Филоненко. – М.: Электроника, 2007. – № 6. – С. 45–49.

117. Fundamental problem of heat transmission in the closed volume of inert gas / D. Starosek, A. Khomyakov, D. Ozerkin, V. Tuev, A. Chulkov // 2019 Interna-

tional Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Tomsk). – 2019. – P. 1–5.

118. Исследование люминофоров для светодиодных излучающих элементов ленточного типа / В.С. Каменкова, Ю.В. Ряполова, Д.Г. Старосек, А.А. Вилисов // Высокие технологии в современной науке и технике / V Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (Томск). – 2016. – С. 221–222.

119. Junction temperature simulation of multichip module LED package / J. Ahn, D. Kim, C.R. Lee, B.J. Baek // Materials Research Innovations (San Diego). – 2014. – V. 18, suppl. 2. – P. S2-748–S2-752.

120. Thermal analysis of chip-on-flexible LED packages with Cu heat sinks by SnBi soldering / Y. Liu, F. Sun, C.A. Yuan, G. Zhang // Microelectronics International (Bingley). – 2016. – V. 33, iss. 1. – P. 42–46.

121. Пат. 172287 РФ, МПК F 21 К 9/00 (2016.01) 172 287 U1. Светодиодная лента для лампы / А.А. Вилисов (РФ), А.Ю. Олисовец (РФ), Ю.В. Ряполова (РФ), В.С. Солдаткин (РФ), Д.Г. Старосек (РФ), В.И. Туев (РФ). – № 2 016 122 381; заявл. 06.06.2016; опубл. 04.07.2017, Бюл. № 19. – 9 с.

122. Пат. 183304 РФ, МПК F 21 V 29/00 (2015.01), F 21 Y 105/12 (2016.01) 183 304 U1. Светодиодная лента для лампы / К.Н. Афонин (РФ), А.А. Вилисов (РФ), Д.В. Озёркин (РФ), Ю.В. Ряполова (РФ), В.С. Солдаткин (РФ), Д.Г. Старосек (РФ), В.И. Туев (РФ). – № 2 017 146 187; заявл. 27.12.2017; опубл. 17.09.2018, Бюл. № 26. – 10 с.

Приложение А (справочное)

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Старосека Данила Геннадьевича «Стабилизация теплового и электрического режимов в нитевидных модулях светоизлучающих GaN/InGaN диодов» представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника техника

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационной работы Старосека Данила Геннадьевича «Стабилизация теплового и электрического режимов в нитевидных модулях светоизлучающих GaN/InGaN диодов» на предприятии ООО «Руслед».

Теоретические разработки и практические рекомендации по производству светодиодных ламп на основе светодиодных нитевидных модулей светоизлучающих GaN/InGaN диодов заложены на этапе запуска и наладки производства «Лампочки томича».

Разработанные Старосеком Д. Г. тепловые модели светодиодных модулей и проведенные испытания позволили обосновать выбор металлического основания филаментных светодиодных нитевидных модулей (ФСНМ), а также установить, что максимальное число ФСНМ при величине прямого тока 10 мА на 1 элемент в стеклянной колбе А55 и цоколем Е27 составляет не более 4. Большое количество ФСНМ возможно при снижении силы тока и/или увеличении колбы. В соответствии с результатами исследований Старосека Д. Г. и представленными рекомендациями изготовлены экспериментальные образцы ламп, испытания которых подтвердили целесообразность использования технического гелия в качестве газа-наполнителя светодиодных ламп.

Внедрение результатов работы Старосека Д. Г. позволило повысить надёжность светоизлучающих элементов и улучшить технические характеристики светодиодных ламп на светодиодных нитях, производимых нашей компанией.



Главный инженер ООО «Руслед»
П. Д. Колянко

1.10.2019г.

Приложение Б
(справочное)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО «ТУСУР»



[Signature] П.В. Сенченко

2 октября 2019 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
Старосека Данила Геннадьевича «Стабилизация теплового и электрического
режимов в нитевидных модулях светоизлучающих GaN/InGaN диодов»**

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационного исследования Старосека Данила Геннадьевича «Стабилизация теплового и электрического режимов в нитевидных модулях светоизлучающих GaN/InGaN диодов» в учебном процессе при реализации программы магистратуры в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Результаты исследования, изложенные в диссертации, имеют научное и практическое значение. Выводы и рекомендации диссертационного исследования используются при реализации Основной образовательной программы высшего образования по направлению подготовки магистров 27.04.04 «Управление в технических системах», магистерская программа «Управление в светотехнических системах».

Руководитель магистерской программы
«Управление в светотехнических
системах», д.т.н., заведующий кафедрой
РЭТЭМ

[Signature]

В. И. Туев

Приложение В (справочное)

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по научной работе и
инновациям ФГБОУ ВО «ТУСУР»

_____ А.Г. Лоцилов

10 сентября 2019 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы «Стабилизация теплового и электрического режимов в нитевидных модулях светоизлучающих GaN/InGaN диодов»
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.04.04 – физическая электроника
Старосека Данила Геннадьевича

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Д. Г. Старосека использованы 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 проекта «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.

Результаты диссертационного исследования Д. Г. Старосека использованы при разработке программы и методик испытаний экспериментальных образцов лампы светодиодной ЕГВА.433751.704 ПМ и применяются в институте при испытаниях светодиодных ламп с конвекционным газовым охлаждением. Оригинальная конструкция установки тестирования образцов нитевидных модулей светоизлучающих GaN/InGaN диодов применяется для измерения тепловых характеристик образцов в гелиевой атмосфере.

Внедрение результатов работы Д. Г. Старосека позволило повысить достоверность результатов испытаний светоизлучающих элементов, изготовленных по технологии Chip-on-Board (Чип на плате).

Директор
НИИ СТ, д.т.н., доцент
_____ В.И. Туев
10 » 10 2019 г.

Приложение Г (справочное)



Общество с ограниченной ответственностью
«ЭргоЛайт»

Юр. адрес: 634057, г. Томск, ул. Говорова, 46-26
Фактический адрес: 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 101А, оф. 423
Тел. (382-2) 22-56-30, E-mail: office@ergolight.ru, <http://www.ergolight.ru>
ОГРН 1107017014829 ИНН 7017267816 КПП 701701001

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы «Стабилизация теплового и электрического режимов в нитевидных модулях светоизлучающих GaN/InGaN диодов» на соискание степени кандидата технических наук Старосека Данила Геннадьевича

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Старосека Д. Г. «Стабилизация теплового и электрического режимов в нитевидных модулях светоизлучающих GaN/InGaN диодов» обладают актуальностью, представляют практический интерес и внедрены на Российском заводе энергосберегающего оборудования «ЭргоЛайт».

Представленная в диссертационной работе математическая модель топологической термокомпенсации и предложенный метод локализации источников тепловой энергии используются при разработке топологии печатных плат терморегуляторов, в частности учитывается метод дихотомии при расположении симисторов высокой мощности.

Внедрение результатов работы Старосека Д. Г. позволило снизить тепловую нагрузку печатного узла терморегулятора, и как следствие, повысить надёжность и потребительскую привлекательность устройства в целом.

Директор ООО «ЭргоЛайт», к.т.н.

Начальник производственного
отдела ООО «ЭргоЛайт»

Инженер-тестировщик



Шевелёв М. Ю.

25.09.2019г.

Зубков К. А.

Вишняков В. Е.

**Приложение Д
(справочное)**



**школа
цифровых
технологий**

Общество с ограниченной ответственностью «Бравый Страус»
ОГРН 1087017005240 ИНН 7017206299 КПП 701701001 634034, г. Томск, ул.
Красноармейская, дом № 119, оф. 245 e-mail: cmit@cmit.ru

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы Старосека Д. Г.
«Стабилизация теплового и электрического режимов в нитевидных модулях
светоизлучающих GaN/InGaN диодов»**

Настоящим Актом удостоверяется, что разработанные Старосеком Данилом Геннадьевичем в рамках диссертационной работы «Стабилизация теплового и электрического режимов в нитевидных модулях светоизлучающих GaN/InGaN диодов» методики и практические рекомендации внедрены в нашей компании.

Результаты диссертационной работы использованы при разработке программы кружка в модуле «Проектирование и технология печатного узла». Предложенная алгоритмическая модель локализации светодиодных кристаллов применима к процессу разработки электронных устройств и позволяет проектировать печатные узлы с улучшенными показателями надёжности за счёт снижения температуры всей конструкции. Также использованы рекомендации по компьютерному моделированию физических процессов, протекающих в электронных устройствах.

Внедрение результатов работы Старосека Д. Г. позволило повысить эффективность компьютерного моделирования и компетентность разработчиков.

Директор
ООО «Бравый страус»



Приложение Е
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 172287

СВЕТОДИОДНАЯ ЛЕНТА ДЛЯ ЛАМПЫ

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

Авторы: *Вилисов Анатолий Александрович (RU), Олисовец Артём Юрьевич (RU), Ряполова Юлия Витальевна (RU), Солдаткин Василий Сергеевич (RU), Старосек Данил Геннадьевич (RU), Туев Василий Иванович (RU)*

Заявка № 2016122381

Приоритет полезной модели 06 июня 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 04 июля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 06 июня 2026 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 Г.П. Ильев



Приложение Ж
(справочное)

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