

На правах рукописи



Афонин Кирилл Нильевич

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

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель: **Туев Василий Иванович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга, ТУСУР

Официальные оппоненты: **Полисадова Елена Федоровна**, доктор физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор отделения материаловедения инженерной школы новых производственных технологий

Туркин Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», доцент кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем

Ведущая организация: ООО "Научно-исследовательский институт источников света имени А.Н. Лодыгина", г. Саранск

Защита состоится «08» июня 2021 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе ТУСУР по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская 146, а также на сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/yta4psfb>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Развитие области полупроводниковой электроники привело к созданию твердотельных источников света – светодиодов (СД). В настоящее время СД являются наиболее перспективными источниками света из-за их высокой светоотдачи и надежности, быстрого достижения яркости, длительного срока службы, низкой потребляемой мощности, низкой стоимости их обслуживания, а также из-за экологической безопасности для окружающей среды.

В конструкции светодиодных ламп на единичных светоизлучающих диодах печатная плата со светодиодами располагается на массивном основании, обеспечивающем тепловой режим светодиодов.

Существенным недостатком светодиодных ламп на единичных светоизлучающих диодах является выраженный «прожекторный эффект», т.е. несферическое пространственное распределение света.

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

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

основе с улучшенными тепловыми параметрами является актуальной задачей.

Степень разработанности темы

На режим работы и срок службы светодиодного элемента напрямую влияет его рабочая температура. Решению вопросов снижения температуры полупроводниковых структур посвящены труды коллективов авторов из Китая, Франции, США, России и др. Улучшение тепловых характеристик светодиодных ламп приводит к увеличению надёжности и срока службы и улучшению светотехнических параметров.

Вопросы теории тепломассообмена и расчёта теплового режима приборов подробно рассмотрены в трудах Лыкова А.В. Дульнева Г.Н., Парфенова В.Г., Сигалова А.В., Кузнецова Г.В. и др.

Изучению температурных зависимостей светодиодного модуля в светоизлучающих устройствах посвящены работы представителей таких научных школ, как Ульяновский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Сергеев В.А., Смирнов В.И., Фролов И.В. и др.), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Смирнов С.В., Малютин Н.Д., Еханин С.Г., Троян П.Е., Старосек Д.Г. и др.), Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов (Вилисов А.А., Воропаев М.В., Каримбаев Д.Д. и др.), Национальный исследовательский Томский государственный университет (Коханенко А.П., Войцеховский А.В., Лозовой К.А. и др.) и др. Однако задачи обеспечения теплового режима светодиодных ламп с нитевидными светодиодными модулями на основе кристаллов GaN/InGaN решены не окончательно.

Цели и задачи работы

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

В настоящей работе достижение цели ограничено решением следующих задач:

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

- 2) применение разработанной модели для анализа температурных полей в структуре нитевидного светодиодного модуля и светодиодной

лампы и разработка новых технических решений с улучшенными тепловыми свойствами.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется применением метода конечно-элементного анализа и моделирования тепловых характеристик СДМ на основе кристаллов GaN/InGaN и созданием на этой основе новых светотехнических устройств с улучшенными эксплуатационными характеристиками, и в том числе, с увеличенным значением срока службы.

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

1. Математическая модель светодиодного модуля, представляющего собой последовательность кристаллов GaN/InGaN, расположенных на плоском основании и помещенных в замкнутый объем однородной среды, ограниченный теплоизолирующей оболочкой сложной формы, позволяющая рассчитывать значения температуры кристаллов, основания, внутренней среды и поверхности оболочки, расположенной в воздушной среде.
2. Установленная гиперболическая зависимость температуры кристаллов GaN/InGaN светодиодного модуля от теплопроводности материала линзы, дополняющей конструкцию лампы.
3. Новый способ стабилизации теплового режима светодиодных модулей в лампе с использованием электронного газа.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в том, что в рамках одного метода исследованы явления теплопереноса в системе «последовательность полупроводниковых кристаллов – подложка – заполняющий колбу газ – колба светодиодной лампы» с последующим конвекционным охлаждением, что позволяет учитывать влияние каждого из участков на температуру кристаллов GaN/InGaN.

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

Разработаны новые устройства светодиодной лампы, защищенные патентами на изобретение и полезные модели:

- 1) светодиодная лента для лампы (2 варианта);
- 2) светодиодный источник излучения;

- 3) светодиодная лампа (2 варианта);
- 4) светодиодный облучатель.

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

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

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

Результаты диссертационной работы также используются в учебном процессе в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по дисциплине «Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий» для выполнения вычислительных экспериментов бакалаврами направления подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», профиль «Технология электронных средств».

Методы исследования

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

Научные положения, выносимые на защиту

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

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

3. Введение источника свободных электронов, температурно-сопряженного со светодиодными модулями на основе кристаллов GaN/InGaN, позволяет до 15 % уменьшить температуру модулей в светодиодной лампе.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты работы представлены на научно-технических конференциях различных уровней, среди которых всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Россия, Томск, 2015); международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Россия, Томск, 2016 – 2020); международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Россия, Томск, 2016); четырнадцатая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Россия, Новосибирск, 2018); международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Россия, Томск, 2016, 2018); международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Россия, Томск, 2019).

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 24 работах: две статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ; восемь статей, индексируемых реферативными базами данных Web of Science и Scopus; 14 материалов докладов на всероссийских и международных конференциях. По результатам исследований получено шесть патентов РФ на изобретение и полезные модели.

Личный вклад автора

Автором лично проведены создание математической модели распределения температуры в конструкции GaN/InGaN кристаллы-подложка-газовая среда колбы-колба светодиодной лампы и тепловой расчёт конструкций в программе Ansys. Экспериментальные исследования выполнены 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».

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Объём работы составляет 113 страниц машинописного текста, включая 45 рисунков, 22 формулы, 12 таблиц и список литературы из 134 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана оценка актуальности работы на основе аналитического обзора, сформулированы цель и задачи работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор методов анализа теплопередачи, кратко рассмотрены классические методы решения дифференциального уравнения теплопроводности, методы интегрального преобразования, методы численных решений. Обоснованно выбран метод исследования – метод конечных элементов (МКЭ). Конвекция учитывается через коэффициент, который задаётся для каждой поверхности, расположенной в контакте с окружающей тело газовой средой. По оценкам различных коллективов исследователей, для естественной конвекции в газовых средах коэффициент лежит в пределах от 1 до 30 Вт/(м²·К). Ограничения метода: решение нестационарных задач с помощью МКЭ представляет собой отдельную сложность.

Описаны способы обеспечения теплового режима современных светодиодных ламп, рассмотрены и проанализированы существующие конструкции светодиодных ламп, выбрана наиболее перспективная конструкция лампы с использованием светодиодных нитей для исследований. Обоснована значимость теплового режима для

светоизлучающих устройств на основе полупроводниковых GaN/InGaN кристаллов.

Вторая глава содержит изложение этапов построения модели, описание моделей СДМ на основе кристаллов GaN/InGaN и светодиодной лампы, результатов тепловых расчётов для построенных моделей в программном комплексе Ansys, результаты оценки адекватности модели.

Светодиодный модуль (рисунок 1, а) состоит из основания с выводами, клеевого слоя, полупроводниковых GaN/InGaN кристаллов и люминофорной композиции. Основание в виде нити имеет размеры $30 \times 1 \times 1$ мм и выводы длиной по 5 мм с каждой стороны. На поверхность основания нанесён слой теплопроводящего клея с размерами $28 \times 0,7 \times 0,03$ мм. Полупроводниковые кристаллы планарного типа с размерами $480 \times 200 \times 130$ мкм в количестве 28 штук расположены на клеевом слое таким образом, чтобы длинная сторона кристалла была сонаправлена с длинной стороной основания. Основание с кристаллами окружено люминофорной композицией в форме цилиндра с диаметром 1,7 мм и длиной 30 мм (рисунок 1, б).

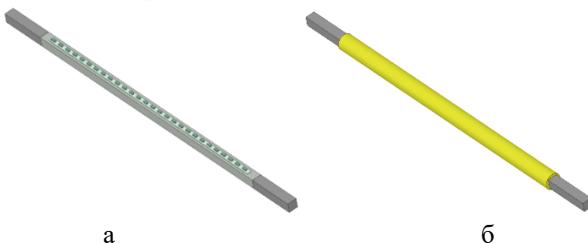


Рисунок 1 – Общий вид СДМ без люминофорной композиции (а) и с нанесенной композицией (б)

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

Теплопередача в СДМ вне лампы осуществляется следующим образом. Генерация тепла равномерно распределена между кристаллами и составляет 13,4 мВт для каждого. Сгенерированное кристаллами тепло передаётся соприкасающимися с ними клеевому слою и люминофорной композиции. От клеевого слоя тепловая энергия переходит к основанию с выводами и через выводы и люминофорный слой отводится естественной

конвекцией в окружающую среду с температурой 25 °С. Передача тепла излучением учтена в модели через коэффициент излучательной способности материалов конструкции, поверхности которой находятся в контакте с окружающей средой.

В результате проведённого теплового расчёта для СДМ получена зависимость максимальной температуры кристаллов GaN/InGaN от коэффициента конвекции, изменяющегося в пределах от 1 до 30 Вт/(м²·К) (рисунок 2, а). Тепловое распределение в СДМ (рисунок 2, б) демонстрирует неравномерный нагрев устройства. Температура выводов ниже на 5–6 °С, чем температура в центральной части, где достигается максимум.

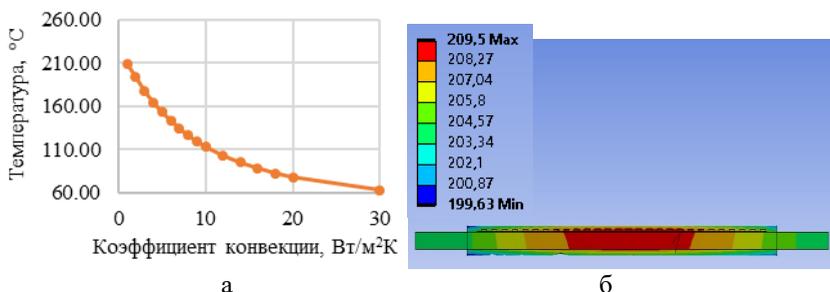


Рисунок 2 – График зависимости максимальной температуры СДМ от коэффициента конвекции (а) и тепловое распределение (б)

Лампа светодиодная (рисунок 3, а) состоит из стеклянной колбы, опорной конструкции с электрическими выводами и восьми СДМ. Для упрощения модели решено пренебречь влиянием источника питания на тепловой режим кристаллов GaN/InGaN. Такое упрощение обосновано тем, что источник питания с цоколем отделены от СДМ герметично запаянной стеклянной колбой и газовой средой. Современные источники питания имеют КПД на уровне 92–95 %, следовательно, только 5–8 % потребляемой электрической мощности преобразовывается в тепло. Проведено предварительное моделирование светодиодной лампы с условием, что всё тепло, генерируемое устройством питания, передаётся через нижнюю часть колбы. В этом случае при рассеиваемой мощности устройства питания 0,56 Вт (с учётом КПД 92 %) температура устройства питания не превышает 40 °С (рисунок 3, б).

Теплопередача в лампе дополняется переносом тепловой энергии от СДМ через газовое наполнение и колбу лампы. Затем тепло отводится в

окружающую среду с температурой 25 °С методом естественной конвекции. Передача тепла излучением учтена в модели через коэффициент излучательной способности стеклянной колбы, поверхность которой находится в контакте с окружающей средой.

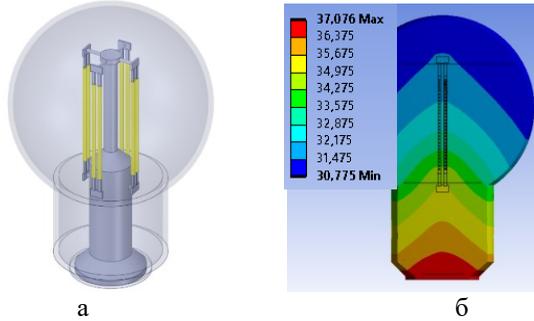


Рисунок 3 – Модель лампы (а) и результаты предварительного теплового расчёта лампы с источником питания (б)

Совместное использование тепловых моделей СДМ и лампы позволяет получать распределение температуры в системе «последовательность GaN/InGaN кристаллов – подложка – заполняющий колбу газ – колба» и проводить исследование влияния каждого из участков на температуру кристаллов GaN/InGaN.

В результате проведённого теплового расчёта лампы получены значения максимальной температуры кристаллов GaN/InGaN в зависимости от коэффициента конвекции от 1 до 30 Вт/(м²·К) и газового наполнения колбы (рисунок 4, а), построено тепловое распределение в лампе с гелиевым заполнением колбы (рисунок 4, б).

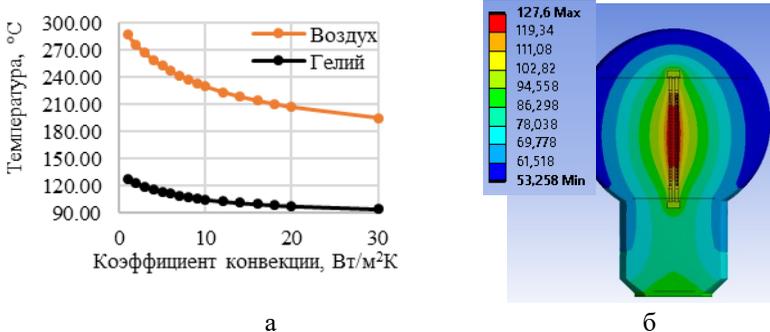


Рисунок 4 – График зависимости максимальной температуры лампы от коэффициента конвекции (а) и тепловое распределение (б)

Исследована зависимость температуры кристаллов GaN/InGaN от теплопроводности заполняющего колбу лампы газа (рисунок 5, а).

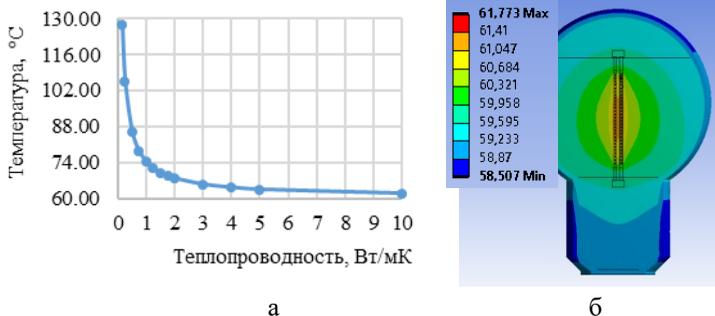


Рисунок 5 – Зависимость температуры кристаллов GaN/InGaN от теплопроводности газа в колбе (а) и тепловое распределение лампы (б)

Увеличение теплопроводности заполняющего газа от 0,15 до 2 Вт/(м·К) снижает максимальную температуру в среднем на 8 %. Последующее увеличение теплопроводности от 2 до 5 Вт/(м·К) снижает температуру в среднем на 2 %, а увеличение теплопроводности от 5 до 10 Вт/(м·К) – на 0,4 %. Полученное тепловое распределение лампы показало выравнивание температуры в исследуемом устройстве, в том числе и температуры СДМ (рисунок 5, б) при увеличении теплопроводности заполняющего газа.

Проведена оценка адекватности модели. Для этого выполнено экспериментальное исследование зависимости температуры кристаллов GaN/InGaN от прямого напряжения и тока. Испытаниям подвергнуто пять макетных образцов СДМ, расположенных на поверхности элемента Пельтье при измерениях. Температура СДМ контролировалась термопарой. Для питания и измерения напряжения СДМ использован высокоточный источник-измеритель Keithley 2410. В ходе эксперимента проведено по три серии измерений напряжения на СДМ для температур 0, 25, 85 °С при токе от 1 до 14 мА. Нагревание и охлаждение СДМ элементом Пельтье осуществлено при отсутствии тока через СДМ. Для исключения влияния саморазогрева кристаллов измерение значений напряжения осуществлялось короткой подачей питания на СДМ.

Полученные данные в результате эксперимента обработаны по правилам математической статистики. Выходной параметр (прямое напряжение U) формируют два фактора – сила тока I и температура T . Значимость влияния выбранных факторов на результирующий показатель

подтверждена методом двухфакторного дисперсионного анализа по одностороннему критерию Фишера. Математическая модель, описывающая зависимость напряжения СДМ от тока и температуры, построена с помощью регрессионного анализа:

$$U = b_0 + b_1 I - b_2 T, \quad (1)$$

где b_0 , b_1 , b_2 – расчётные коэффициенты регрессии, равные 74,617 В, 0,259 В/мА и 0,0354 В/°С соответственно.

Рассчитанное значение средней ошибки аппроксимации составило 0,4 %. Качество уравнения регрессии оценено по коэффициенту детерминации R^2 , значение которого составило 0,948. Проверка статистической значимости коэффициента детерминации проведена с помощью F-статистики распределения Фишера. Для этого рассчитано значение F-критерия, равное 352. Полученное значение больше критического (3,23) по уровню значимости 0,05, а значит коэффициент детерминации считается статистически значимым, а уравнение регрессии статистически надёжным.

В третьей главе показано использование предложенной тепловой модели для исследования тепловых свойств конструкции «последовательность GaN/InGaN кристаллов – подложка – заполняющий колбу газ – колба светодиодной лампы». На основании проведенных исследований предложены новые технические решения светодиодной ленты и светодиодной лампы.

Как показано на рисунке 2, б, равномерное распределение кристаллов вдоль продольной оси подложки приводит к перегреву в ее центральной части. Для устранения этого недостатка предложено новое техническое решение светодиодной ленты для лампы.

Предлагаемое техническое решение [25] отличается от известной конструкции тем, что кристаллы расположены на подложке на переменном расстоянии друг от друга, значение которого изменяется вдоль продольной оси подложки от наибольшего значения $1,5L/(N-1)$ между центрами кристаллов в середине подложки до значения $0,5L/(N-1)$ на ее концах, где L – длина подложки; N – количество излучающих кристаллов GaN/InGaN ($N=3, 4, \dots$) (рисунок 6, а).

Более эффективное отведение тепла в центре подложки позволяет повысить равномерность распределения температуры по длине подложки и уменьшить ее значение, что наглядно демонстрируется расчетом по разработанной модели светодиодной ленты для лампы и приводит к

выравниванию температурного профиля (рисунок 6, б). Температура в центре подложки снизилась на 3 °С.

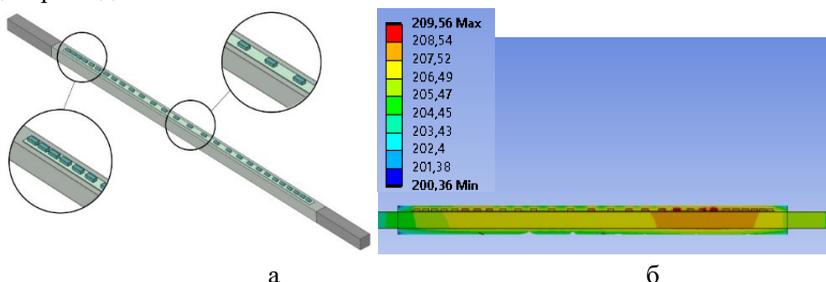


Рисунок 6 – Светодиодной лента для лампы (а) и ее тепловая модель (б)

Проведено моделирование светодиодной лампы с предложенной конструкцией СДМ и выполнен тепловой расчёт (рисунок 7). Модель лампы заполнена гелием, параметры используемых материалов аналогичны модели лампы на рисунке 4, а. По сравнению с аналогичной моделью предложенное техническое решение позволило снизить температуру светодиодной лампы на 3,7 °С, или на 3 %. Представленный способ расположения кристаллов вдоль подложки может быть применен и в светодиодной ленте для лампы [28].

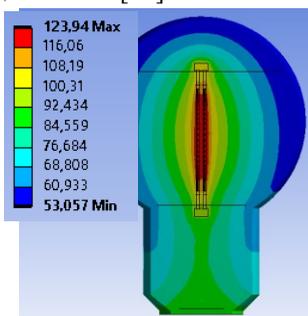


Рисунок 7 – Тепловое распределение светодиодной лампы с СДМ с распределёнными кристаллами

Предложено новое техническое решение, отличающееся от известных добавлением в вершину колбы оптически прозрачного резиноподобного теплопроводящего материала, в который погружены СДМ с объемной конструкцией на глубину, равную видимой металлизированной части СДМ (рисунок 8, а). За счет погружения СДМ в теплопроводящий материал повышается эффективность отвода тепла от светодиодных нитей.

По разработанной модели светодиодной лампы (рисунок 8, б) проведён расчёт распределения температуры при заполнении колбы лампы воздухом и гелием (рисунок 9, а). Значение коэффициента теплопроводности материала линзы изменялось от значения газовой среды внутри лампы 0,026 Вт/(м·К) для воздуха до 20 Вт/(м·К).

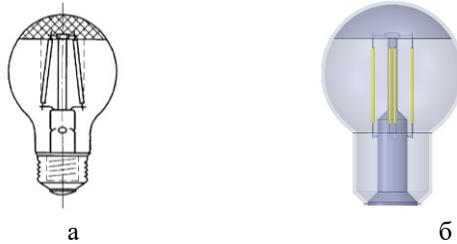
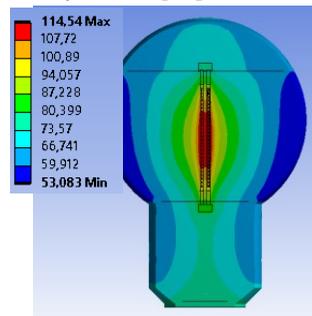
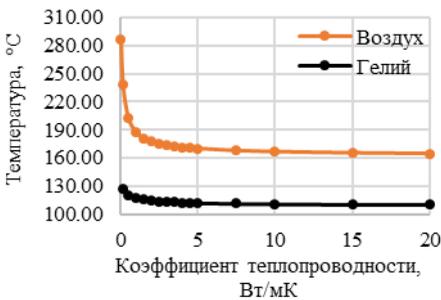


Рисунок 8 – Схематическое изображение лампы с линзой (а) и ее 3D-модель (б)

На рисунке 9, б представлено тепловое распределение для модели лампы с линзой из материала с теплопроводностью 2 Вт/(м·К). В отличие от теплового распределения модели лампы, заполненной гелием, линза увеличивает теплоотвод от СДМ, что отчётливо видно на рисунке.

Расчёт теплового распределения в конструкции с различными значениями теплопроводности материала линзы может быть применен для анализа тепловых свойств светодиодного облучателя [29].



а

б

Рисунок 9 – Зависимость максимальной температуры устройства от теплопроводности линзы (а) и тепловое распределение лампы (б)

Для проведения экспериментального исследования изготовлены два макета лампы, заполненных воздухом, без линзы (№ 1, 2), два макета лампы с линзой (№ 3, 4) и два макета ламп с гелием (№ 5, 6). В качестве материала линзы использован компаунд Dow Corning Sylgard 184 с

теплопроводностью 0,15 Вт/(м·К). Измерения проведены в соответствии с ГОСТ Р 55702. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

Номер макета лампы	Световой поток (Φ), лм	Мощность (P), Вт
1	$914 \pm 10\%$	$7,62 \pm 0,2\%$
2	$908 \pm 10\%$	$7,59 \pm 0,2\%$
3	$938 \pm 10\%$	$7,68 \pm 0,2\%$
4	$934 \pm 10\%$	$7,65 \pm 0,2\%$
5	$1070 \pm 10\%$	$7,71 \pm 0,2\%$
6	$1065 \pm 10\%$	$7,79 \pm 0,2\%$

Увеличение светового потока в лампе с линзой (см. таблицу 1) подтверждает снижение температуры кристаллов GaN/InGaN. На рисунке 10 представлены измеренные графики углового распределения силы света для лампы без линзы (1) и для лампы с линзой (2). Таким образом, предложенное техническое решение лампы одновременно обеспечивает улучшенный тепловой режим кристаллов GaN/InGaN и меньшую неравномерность пространственного распределения силы света, характеризуется новизной и защищено патентами на полезные модели [26, 27].

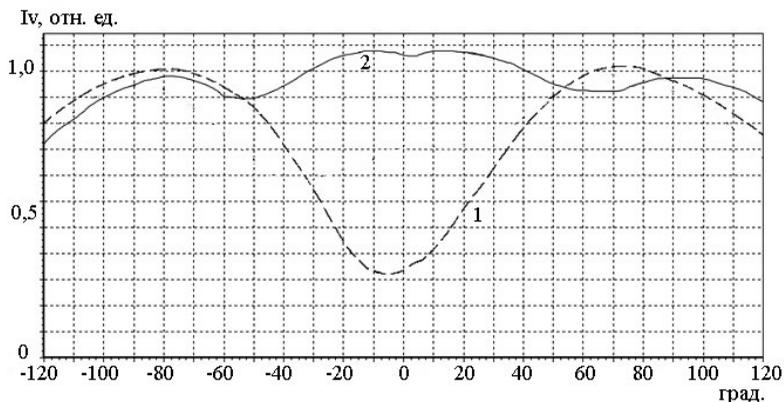


Рисунок 10 – Угловое распределение силы света лампы без линзы (1) и лампы с линзой (2)

Установлено влияние на температуру последовательности кристаллов GaN/InGaN в составе светодиодной лампы коэффициента теплопроводности газа в колбе лампы (рисунок 5), причем максимум

эффективности наблюдается именно в области малых значений коэффициента теплопроводности газа.

Конструкция светодиодного источника излучения, в котором коэффициент теплопроводности среды в колбе увеличен совместным использованием молекулярного и электронного газов [30], представлена на рисунке 11 и состоит из стеклянной колбы (1), внутренняя поверхность которой покрыта оптически прозрачным слоем электропроводящего материала (4).

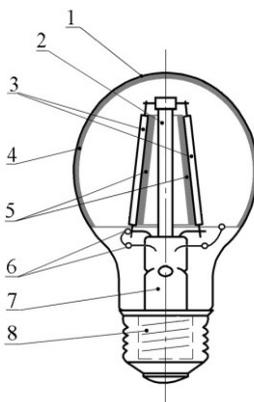


Рисунок 11 – Схематическое изображение светодиодного источника излучения

Внутри колбы расположен штенгель (7) со стойкой сердечника (2), к которому крепится конструкция в виде внешней поверхности усеченного конуса (5), изготовленного из электропроводящего материала с покрытием его внешней поверхности монослоем вещества с малой работой выхода. СДМ (3) закреплены на внешнюю сторону конструкции и соединены с выводами сердечника и штенгеля. К конструкции с закрепленными на нем СДМ присоединен отрицательный полюс (6) источника напряжения от устройства питания (8), а положительный полюс – к проводящему слою на внутренней поверхности стеклянной колбы.

Вычислительный эксперимент на основе молекулярно-кинетической модели газа подтвердил работоспособность конструкции. Определена концентрация электронов в колбе лампы для получения трехкратного увеличения эффективности охлаждения, ее значение $n_e \cong 2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Рассчитана длина свободного пробега, этот параметр характеризует

подвижность электронов λ_e и атомов λ_i и, соответственно, составляет $\lambda_e \cong 3,0$ см, $\lambda_i \cong 2,58 \cdot 10^{-5}$ см. Полученные значения показывают, что если атомы в процессе их диффузии от СДМ до стенки стеклянной колбы диаметром 6–7 см испытают порядка 10^5 столкновений, то электроны – всего несколько столкновений. Также, используя известные формулы, оценена теплопроводность гелия χ_i и электронного газа χ_e по имеющимся данным. Значение для гелия составило $\chi_i = 1,5 \cdot 10^{-3}$, для электронного газа – $\chi_i = 4,5 \cdot 10^4$.

В результате проведенного анализа установлено и вычислительным экспериментом подтверждено, что дополнительное использование в качестве охлаждающего агента электронов позволяет уменьшить температуру кристаллов GaN/InGaN до 15 % при увеличении теплопроводности газа от 0,15 до 0,25 Вт/(м·К).

Ресурсные испытания светодиодного модуля и ламп

Изготовлены макеты СДМ и проведены экспериментальные исследования температурных зависимостей спектра излучения, яркости, вольт-амперных (ВАХ) и колориметрических характеристик [1, 2]. При увеличении температуры окружающей среды в диапазоне от 0 до 90 °С происходит сдвиг максимума спектра излучения, соответствующего синему цвету свечения кристалла, на 5 нм в сторону больших длин волн, однако увеличение температуры не повлияло на интенсивность спектра люминофора. Из этого можно сделать вывод, что эффект температурного тушения люминофора не наблюдается. Экспериментально установлено, что увеличение температуры сопровождается снижением яркости СДМ: при нагревании от 0 °С до 90 °С яркость снижается на 11 %. Доминирующая длина волны и коррелированная цветовая температура (КЦТ) при фиксированном прямом токе СДМ на участке температур от 0 °С до 90 °С линейно возрастают.

Определено численное значение теплового сопротивления «основание СДМ – среда». Для этого измерено семейство вольт-амперных характеристик СДМ в условиях размещения СДМ на поверхности элемента Пельтье, причём основание СДМ плотно прижималось к поверхности элемента. В этом случае температура на поверхности

элемента Пельтье равнялась температуре основания СДМ. На рисунке 12, а представлено семейство ВАХ СДМ при значениях температуры 0 °С (кривая 1), 25 °С (кривая 2), 85 °С (кривая 3).

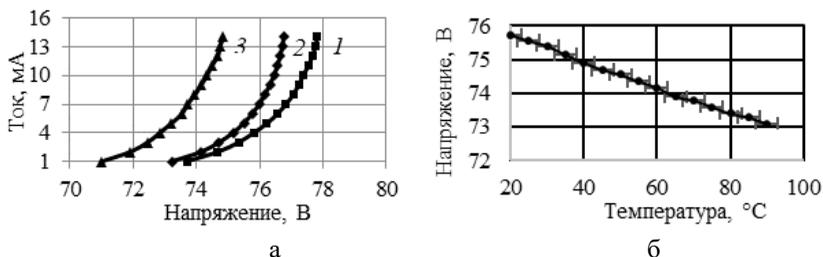


Рисунок 12 – Температурные зависимости ВАХ (а) и напряжения при значении прямого тока 10 мА (б)

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

Затем проведено измерение зависимости напряжения от температуры для СДМ, расположенного в лабораторной электропечи, при значении прямого тока 10 мА (рисунок 12, б). При расположении СДМ в лабораторной электропечи температура основания превышала температуру внутри печи вследствие нагрева от кристаллов. Установлено, что при температуре 85 °С на элементе Пельтье значение напряжения на СДМ составляет 74,3 В. При той же температуре окружающей среды в печи значение напряжения на СДМ составляет 73,29 В.

По известным формулам определена разность температур основания СДМ, учитывая, что зависимость изменения прямого напряжения от изменения температуры составляет минус (1,76...2,3) мВ/К. Тепловое сопротивление R_t «основание СДМ – среда» рассчитано по формуле

$$R_t = \frac{\Delta T}{P} = (22...29) \text{ К/Вт}. \quad (2)$$

Полученное экспериментально значение теплового сопротивления «основание СДМ – среда» (22...29) К/Вт хорошо согласуется с полученным теоретическим значением (30 К/Вт), расчёт которого приведён в [1].

Изготовлены макетные образцы светодиодной лампы общего назначения мощностью 4 Вт и проведены измерения светового потока (рисунок 13, а), световой отдачи и спектра излучения (рисунок 13, б) при длительной наработке [2]. За 10 000 ч световой поток снизился с 425 до 290 лм (на 31 %). Световая отдача снизилась на 26,4 лм/Вт (35 %).

После 10 000 ч наработки (сплошная линия на графике) синяя составляющая спектра светодиодной лампы – излучение кристалла – относительно спектра излучения люминофора увеличилась по сравнению с исходным спектром на 0,25 относительных единиц (41 %), что связано с деградацией люминофорной композиции.

Исследования показали, что основные параметры светодиодных ламп снижаются в процессе длительной наработки. Однако за 10 000 ч работы ни один из параметров не достиг критерия отказа лампы (снижение на 50 %).

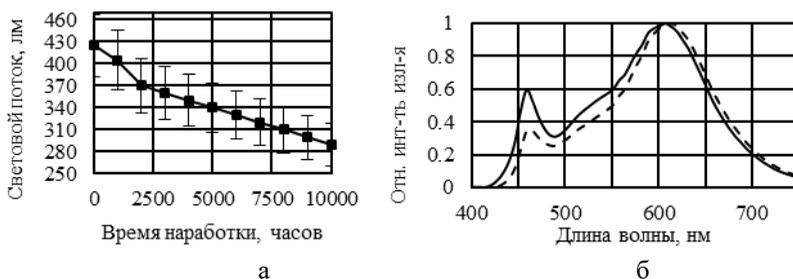


Рисунок 13 – Результаты измерений светового потока (а) и спектра (б) в процессе испытаний

Проведены испытания при воздействии повышенной температуры окружающей среды. Выбраны 10 макетов светодиодных ламп, выполнены измерения значений светового потока и потребляемой мощности. Макеты ламп установили в цоколи, смонтированные в камере с температурой 45 °С. После 1000 ч непрерывной работы проведены повторные измерения параметров (таблица 2).

Таблица 2 – Значения параметров макетов ламп

Испытываемый параметр	До испытаний	После испытаний
Световой поток, лм	400±10%	390±10%
Потребляемая мощность, Вт	3,77±0,2%	3,72±0,2%

Установлено, что значения параметров светового потока, потребляемой мощности и световой отдачи 10 шт. макетов светодиодных ламп изменились на 2,5 %.

Проведены испытания устройства питания лампы в соответствии с методикой ГОСТ ИЕС 62612-2019 п.11.3.3, выбраны 10 макетных образцов светодиодных ламп мощностью 4 Вт. Испытания проводились в автоматическом режиме при использовании специально разработанного устройства (ЕГВА.421417.701) для определения срока службы встроенного источника питания лампы. Результаты показали, что количество циклов при испытании устройства питания светодиодной лампы составило 19440 без потери работоспособности. Следовательно, по ГОСТ ИЕС 62612-2019 п.11.3.3 срок службы источника питания лампы составляет не менее 38,9 тысяч часов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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

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

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

3. Разработаны новые устройства:

а) светодиодная лампа с линзой;

б) светодиодный источник излучения, содержащий колбу, заполненную газом, имеющим высокий коэффициент теплопроводности. Предложенная новая конструкция позволяет до 15 % уменьшить температуру кристаллов GaN/InGaN при увеличении теплопроводности заполняющего газа от 0,15 до 0,25 Вт/(м·К) в светодиодной лампе со стеклянной колбой.

Таким образом, выполненная работа заключается в разработке научно-технических основ проектирования светодиодных ламп, содержащих последовательность кристаллов GaN/InGaN, совокупность которых позволила решить научно-техническую задачу, имеющую важное хозяйственное значение в исследовании и разработке новых методов и процессов, которые могут быть положены в основу создания оптических и оптико-электронных приборов, систем и комплексов различного назначения, а также созданию и внедрении нитевидных светодиодных модулей и светодиодных ламп с улучшенными тепловыми параметрами, что позволило увеличить надежность и срок службы этих устройств.

Перспективы дальнейшей разработки темы включают создание макета светодиодной лампы с СДМ и заполнением колбы лампы электронным газом; проведение экспериментального исследования и оценку тепловых характеристик макетов светодиодной лампы, колба которой заполнена электронным газом; разработку новых светотехнических устройств на основе нитевидных СДМ с улучшенными тепловыми и световыми характеристиками.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в ведущих рецензируемых изданиях

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

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

Публикации в журналах, индексируемых базами Web of Science, SCOPUS

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

4. Afonin, K.N. LED lamp design optimizing on minimum non-informity of light intensity distribution in space / K.N. Afonin, A.Y. Olisovets, Y.V. Ryapolova, V.S. Soldatkin, D.G. Starosek, V.I. Tuev , V.G. Hristyukov // APEIE. – 2016. – P. 153-155. – DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806435.

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

6. Starosek, D. Dependence on gas of the thermal regime and the luminous flux of LED filament lamp / D. Starosek, A. Khomyakov, K. Afonin, Y. Ryapolova, V. Tuev // AIP Conference Proceedings (pfsd-2016). – 2016. – Vol. 1772. – P. 060008. – DOI: 10.1063/1.4964588.

7. Afonin, K. Operation Characteristics of LED Filament Bulbs / K. Afonin, A. Vilisov, V. Kamenkova, V. Soldatkin, V. Tuev, Yu. Yulaeva // APEIE. – 2018. – P. 376-379. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545675.

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

9. Afonin, K. Inkjet-Printed Filament for LED Bulbs / K. Afonin, I. Banshchikova, V. Soldatkin, V. Tuev, A. Schkarupo, Y. Yulaeva // Proceedings – USBEREIT. – 2019 – No 8736591. – P. 332-335. – DOI: 10.1109/USBEREIT.2019.8736591.

10. Ivanov, A.A. Thermal characteristics simulation of LED emitting element containing filled polyaluminosilicate in structure as heat-conducting adhesive coating / A.A. Ivanov, K.N. Afonin, A.S. Chermoshentseva // IOP Pub.: Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. – No 1488. – P. 012–018. – DOI: 10.1088/1742-6596/1488/1/012018.

Материалы международных и всероссийских конференций

11. Афонин, К.Н. Результаты моделирования тепловых характеристик светодиодного излучающего элемента / К.Н. Афонин, М.В. Андреева, Е.С. Ганская, К.В. Тепляков // ЭСИСУ. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С. 252-255 с.

12. Афонин, К.Н. Моделирование тепловых характеристик светодиодной лампы в колбе А60 / К.Н. Афонин, К.В. Тепляков // Научная сессия ТУСУР. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 292-294.

13. Afonin, K.N. Simulation of thermal characteristics of the LED lamp with a B36 bulb / K.N. Afonin // Научная сессия ТУСУР. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 4. – С. 77-80.

14. Афонин, К.Н. Моделирование тепловых характеристик светодиодной лампы в колбе А55 / К.Н. Афонин, К.В. Тепляков // Актуальные проблемы современной науки. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – С. 69-72.

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

16. Неверовский, К.А. Тепловое моделирование светодиодной лампы / К.А. Неверовский, Ю.В. Ряполова, Е.О. Постолова, К.Н. Афонин // Научная сессия ТУСУР. – Томск: В-Спектр, 2016. – Ч. 2. – С. 243-244.

17. Постолова, Е.О. Оптическое моделирование светодиодной лампы / Е.О. Постолова, Ю.В. Ряполова, К.А. Неверовский, К.Н. Афонин // Научная сессия ТУСУР. – Томск, 2016. – Ч. 2. – С. 244-246.

18. Афонин, К.Н. Срок службы светодиодных ламп / К.Н. Афонин, Ю.В. Ряполова, Д.Г. Старосек // Перспективы развития фундаментальных наук. – Томск, 2016. – Т. 7. – С. 18-20.

19. Афонин, К.Н. Светодиодная лампа для низковольтных сетей / К.Н. Афонин, В.С. Каменкова, В.С. Солдаткин // ЭСисУ. – Томск: В-Спектр, 2016. – Ч. 1. – С. 86-87.

20. Афонин, К.Н. Ресурсные испытания светодиодной лампы 10 Вт / К.Н. Афонин, В.С. Каменкова // Научная сессия ТУСУР. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 3. – С. 123-125.

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

22. Саинский, А.Г. Исследование тепловых характеристик светодиодного излучающего элемента / А.Г. Саинский, А.И. Черепнев, К.Н. Афонин, К.В. Тепляков // Научная сессия ТУСУР. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 289-292.

23. Афонин, К.Н. Особенности применения ультразвуковой сварки в технологии изготовления светодиодов и светодиодных ламп / К.Н. Афонин, Ю.В. Ряполова, В.С. Солдаткин // Научная сессия ТУСУР. – Томск, 2015. – Ч. 2. – С. 105-108.

24. Афонин, К.Н. Методы теплового моделирования электронных приборов / К.Н. Афонин // Научная сессия ТУСУР. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 2. – С.161-164.

Патенты

25. Патент на полезную модель 183304 Российская Федерация, СПК F21V 29/00 (2006.01); F21Y 2105/12 (2006.01). Светодиодная лента для лампы / Афонин К.Н., Вилисов А.А., Озеркин Д.В., Ряполова Ю.В., Солдаткин В.С., Старосек Д.Г., Туев В.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТУСУР». – № 2017146187; заявл. 27.12.2017; опубл. 17.09.2018, Бюл. № 26. – 10 с.

26. Патент на полезную модель 185874 Российская Федерация, СПК F21V 14/00 (2018.08). Светодиодная лампа / Афонин К.Н., Вилисов А.А., Солдаткин В.С., Туев В.И., Юлаева Ю.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТУСУР». – № 2018134842; заявл. 01.10.2018; опубл. 21.12.2018, Бюл. № 36. – 10 с.

27. Патент на полезную модель 188947 Российская Федерация, СПК F21V 29/10 (2019.02); F21V 15/04 (2019.02); F21K 9/66 (2019.02). Светодиодная лампа / Афонин К.Н., Вилисов А.А., Солдаткин В.С., Туев В.И., Юлаева Ю.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТУСУР». – № 2018119785; заявл. 23.05.2018; опубл. 30.04.2019, Бюл. № 13. – 10 с.

28. Патент на полезную модель 193054 Российская Федерация, СПК F21S 4/20 (2019.08); F21V 9/00 (2019.08). Светодиодная лента для лампы / Андреева М.В., Афонин К.Н., Вилисов А.А., Ганская Е.С., Солдаткин В.С., Туев В.И., Тепляков К.В. заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТУСУР». – № 2019115062; заявл. 16.05.2019; опубл. 04.10.2019, Бюл. № 28. – 9 с.

29. Патент на полезную модель 192891 Российская Федерация, СПК A01G 7/04 (2006.01). Светодиодный облучатель / Афонин К.Н., Вилисов А.А., Незнамова Е.Г., Юлаева Ю.В., Солдаткин В.С., Туев В.И., Хомяков А.Ю.

заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТУСУР» – № 2019115062; заявл. 16.05.2019; опубл. 04.10.2019, Бюл. № 28. – 10 с.

30. Патент на изобретение №2723967 Российская Федерация, СПК H01L 33/00 (2020.02); F21S 8/00 (2020.02). Светодиодный источник излучения / Давыдов В.Н., Туев В.И., Афонин К.Н., Давыдов М.В., Солдаткин В.С., Вилисов А.А. заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТУСУР» – № 2019133066; заявл. 16.10.2019; опубл. 18.06.2020, Бюл. № 17. – 14 с.