

УДК 621.382.2

На правах рукописи



Старосек Данил Геннадьевич

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

01.04.04 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск — 2019

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Озёркин Денис Витальевич

Официальные оппоненты: **Овчаров Александр Тимофеевич**,
доктор технических наук, профессор кафедры архитектурного проектирования Томского государственного архитектурно-строительного университета (г. Томск).

Капитонов Сергей Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент, директор по научно-техническому развитию Научно-исследовательского института источников света им. А. Н. Лодыгина (г. Саранск).

Ведущая организация: Ульяновский филиал Федерального бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (г. Ульяновск).

Защита состоится «20» декабря 2019 г. В 17 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на официальном сайте ТУСУР <https://postgraduate.tusur.ru/urls/t1uyvzxo>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
д. т. н., профессор



Ю.П. Акулиничев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время наиболее перспективными источниками света (ИС) являются полупроводниковые приборы на основе GaN/InGaN светодиодов, благодаря ряду преимуществ: энергоэффективность ИС на основе светодиодов 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 светодиодов может достигать 30 000 часов. Полупроводниковые ИС находят широкое применение во многих сферах человеческой деятельности и постепенно вытесняют традиционные светотехнические устройства, такие как ИС на основе нитей 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 светодиодов в традиционной стеклянной колбе и стандартным цоколем E27 или E14, позволяет создать инновационную замену традиционным лампам накаливания и компактным люминесцентным лампам. Также ИС на основе ФСНМ обладают преимуществами по сравнению с традиционными светодиодными ИС. 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 светодиодного ИС с ФСНМ позволяет реализовать теплоотвод от ФСНМ с помощью естественной конвекции внутри герметичной колбы. Эффективность подобного способа теплоотвода существенно повышается при равномерном температурном профиле ФСНМ.

Создание температурных условий, необходимых для нормального функционирования прибора, во многом определяют 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 filamentных светодиодных нитевидных модулей.
3. Разработка математической модели распределения плотности теплового потока для filamentных светодиодных нитевидных модулей.
4. Разработка и создание конструкции filamentных 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 ФСНМ. Предложена конструкция ФСИС с улучшенным температурным режимом.

Практическая значимость работы

1. Разработаны конструктивно-технологические рекомендации для изготовления filamentных 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 магистерской программы 27.04.04 «Управление в технических системах».
3. Создан макет filamentного 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», выполняемых в рамках соглашения № 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», выполняемых в рамках соглашения № 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 (метода конечных элементов, метода 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. Использовалось 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, 2 патента РФ, 16 докладов на всероссийских и международных конференциях.

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 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 14 п., интервал 1,5, включая 53 рисунка, 52 формулы, 8 таблиц и списка литературы из 122 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен литературный обзор по тематике исследования. Анализ научно-технической литературы показал, что в настоящее время проблема обеспечения температурного режима светодиодных кристаллов является весьма актуальной. Однако подавляющее большинство работ, связанных с обеспечением температурной стабильности светодиодных осветительных приборов, посвящено устройствам на основе корпусированных светодиодов, изготовленных по технологии поверхностного монтажа. При этом процессы, протекающие в конструкции исследуемого ФСИС, существенно отличаются, так как светодиодные кристаллы располагаются непосредственно на тонкой подложке по технологии Chip-on-Board (кристалл-на-подложке), и охлаждение осуществляется, в большей степени, за счёт конвективных потоков газа внутри колбы, а не теплопроводности в радиаторе традиционного светодиодного осветительного прибора на основе корпусированных светодиодов.

Основным методом исследования тепловых режимов светодиодных источников света является компьютерное моделирование, основанное на методе конечных элементов и осуществляемое посредством современных систем автоматизированного проектирования и инженерных расчетов. Расчётные данные подтверждены с помощью снимков тепловизионных камер, а также определением температуры p - n -перехода по величине прямого тока, протекающего через светодиод.

Анализ зарубежных и отечественных источников позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным методом решения краевых задач теплопроводности обладают численные методы. Исходное дифференциальное уравнение, описывающее процесс переноса тепловой энергии в первой итерации, заменяют конечно-разностными аналогами. Далее подбирается наиболее подходящий метод решения конечно-разностных уравнений с дискретизацией исследуемого процесса по времени и координатам. Затем решается система алгебраических уравнений с учётом начальных и граничных условий.

Во **второй главе** построена математическая модель процесса теплообмена филаментного светодиодного модуля и приведен численный метод её решения. Объектом исследования является филаментный светодиодный нитевидный модуль, представляющий собой сборочную единицу, состоящий из тонкой металлической подложки 1 и массива светодиодных кристаллов 2 (рисунок 1). Подложка характеризуется размерами $l \times k \times m$. Структура подложки – изотропная. Источниками тепла являются N светодиодных кристаллов, расположенных на верхней стороне подложки в областях:

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

где x_{i1}, x_{i2} – габаритные координаты по оси абсцисс;
 y_{i1}, y_{i2} – габаритные координаты по оси ординат;
 $h_{\text{КР}}$ – высота кристалла.

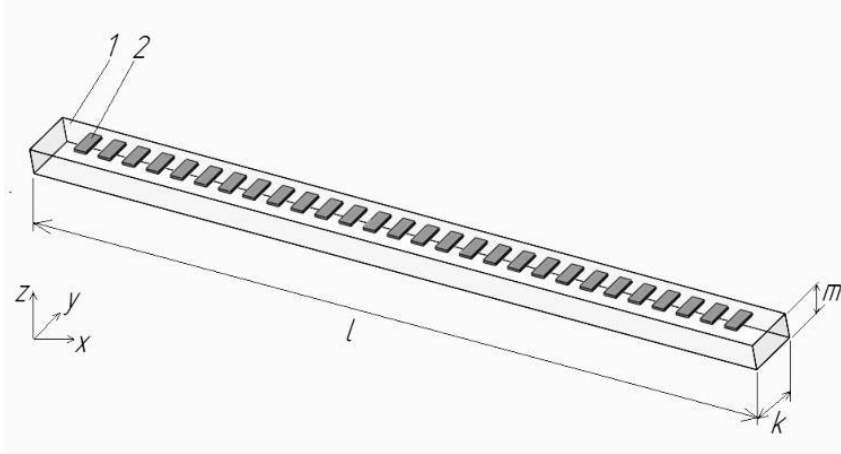


Рисунок 1 – Геометрическая модель объекта исследования

Процесс теплопередачи подложки можно записать в виде уравнения теплопроводности в частных производных:

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

где c – коэффициент теплопроводности;

ρ – плотность;

λ – коэффициент теплопроводности;

q_i – тепловой поток i -ого кристалла.

Область допустимых значений по пространственно-временным координатам такова:

$$0 \leq x \leq l; \quad 0 \leq y \leq k; \quad 0 \leq z \leq m; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{\text{max}}.$$

Распределение плотности теплового потока в сборочной единице неравномерно и подчиняется закону:

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

На поверхностях подложки действуют граничные условия 3 рода:

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

где α – коэффициент теплоотдачи;

T_{CP} – температура окружающей среды.

Начальное условие процесса теплопередачи:

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

Решение уравнения теплопроводности (1) дает искомую функцию $T(x, y, z, \tau)$ в непрерывной области:

$$\Omega = \{0 \leq x \leq l\} \times \{0 \leq y \leq k\} \times \{0 \leq z \leq m\} \times \{0 \leq \tau \leq \tau_{\max}\}.$$

Аналитические методы расчета температурного поля позволяют реализовать лишь простейшие математические модели, поэтому наиболее распространены два основных численных метода решения уравнения (1) в частных производных: метод конечных разностей и метод конечных элементов. Искомое решение численными методами имеет вид:

$$\omega_{p,r,s}^j = T(x, y, z, \tau_j) + O(\Delta\tau^2), \quad (2)$$

где j – временной слой;

p, r, s – узлы дискретизации;

$O(\Delta\tau^2)$ – погрешность численного расчета (погрешность численной математической модели).

Наибольший практический интерес численная модель (2) дает в областях расположения светодиодных кристаллов, т. е. в областях ненулевой плотности теплового потока:

$$q_i(x_i, y_i) = \frac{P_i}{(x_{i2} - x_{i1})(y_{i2} - y_{i1})}.$$

Обозначим температуру, соответствующую геометрическому центру посадочного места кристалла на подложке, как v_i . По результатам серии предварительно проведенных экспериментальных исследований, следует, что рабочие температуры светодиодных кристаллов в стационарном тепловом режиме не равны между собой. Следовательно, и температуры в геометрическом центре посадочных мест кристаллов, не равны:

$$v_1 \neq v_2 \neq \dots \neq v_i \neq \dots \neq v_N.$$

Очевидно, что наличие температурного профиля по длине подложки обусловлено конечным значением коэффициента теплопроводности λ и условиями конвективного теплообмена. Количественно температурный профиль по длине подложки может быть оценен с помощью среднеквадратического отклонения температуры v_i от средней температуры профиля \bar{v} :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}, \quad (3)$$

где N – общее количество кристаллов на подложке.

Для улучшения потребительских (эксплуатационных) параметров ФСИС с конвекционным газовым охлаждением нужно стремиться к выравниванию температурного профиля ФСНМ, т. е. $\sigma \rightarrow 0$.

Далее рассмотрен вариант термостабилизации с помощью метода дихотомии. Выдвинута рабочая гипотеза: для выравнивания температурного

профиля по длине подложки необходимо отказаться от эквидистантного расположения светодиодных кристаллов. Тогда задача о плоском температурном профиле сводится к нахождению функции локализации кристаллов на подложке с целью минимизации среднеквадратического отклонения σ :

$$Loc(x_i, y_i) \Big|_{\sigma \rightarrow 0} = ?$$

Предположим, что размещение светодиодных кристаллов происходит на одном уровне по координате y :

$$y_1 = y_2 = \dots = y_i = \dots = y_N.$$

Значит:

$$Loc(x_i, y_i) = Loc(x_i, y \Big|_{const}) = Loc(x_i).$$

Для отыскания неизвестной функции локализации $Loc(x_i)$ воспользуемся методом дихотомии. Известно, что дихотомия – это последовательное деление на две части, не связанные между собой.

Первый шаг дихотомии – деление длины подложки на две равные части, поскольку температурный профиль для изотропного тела с эквидистантно расположенными источниками тепла имеет симметричный вид. Центральная точка имеет координату:

$$x_c = \frac{x_0 + x_l}{2},$$

где x_0 – начало координат по оси абсцисс;

x_l – длина подложки.

Дальнейшие рассуждения будем вести для правой половины подложки. Пусть новое начало совпадает с точкой x_c :

$$x'_0 = x_c.$$

Тогда на отрезке $[x'_0; x_l]$ будет располагаться $N' = \frac{N}{2}$ кристаллов. Пусть для дальнейших шагов коэффициент дихотомии будет величиной из диапазона значений

$$Coeff \in [1,1 \dots 2,0],$$

т. е. от 10 % до 100 %.

Цикличность предложенного алгоритма предполагает, что можно составить рекуррентную формулу процесса локализации кристаллов, что представлено на рисунке 2. Из алгоритма следует, что приращение шага для локализации очередного кристалла i есть:

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

Локализация очередного кристалла i будет в координате:

$$x_i = x_{i-1} + Coeff \cdot \frac{x_l - x_{i-1}}{(N' - i) + 1}. \quad (4)$$

Полученный результат можно охарактеризовать как функцию локализации, зависящую от аргумента i и от параметра $Coeff$:

$$x_i = Loc(i, Coeff),$$

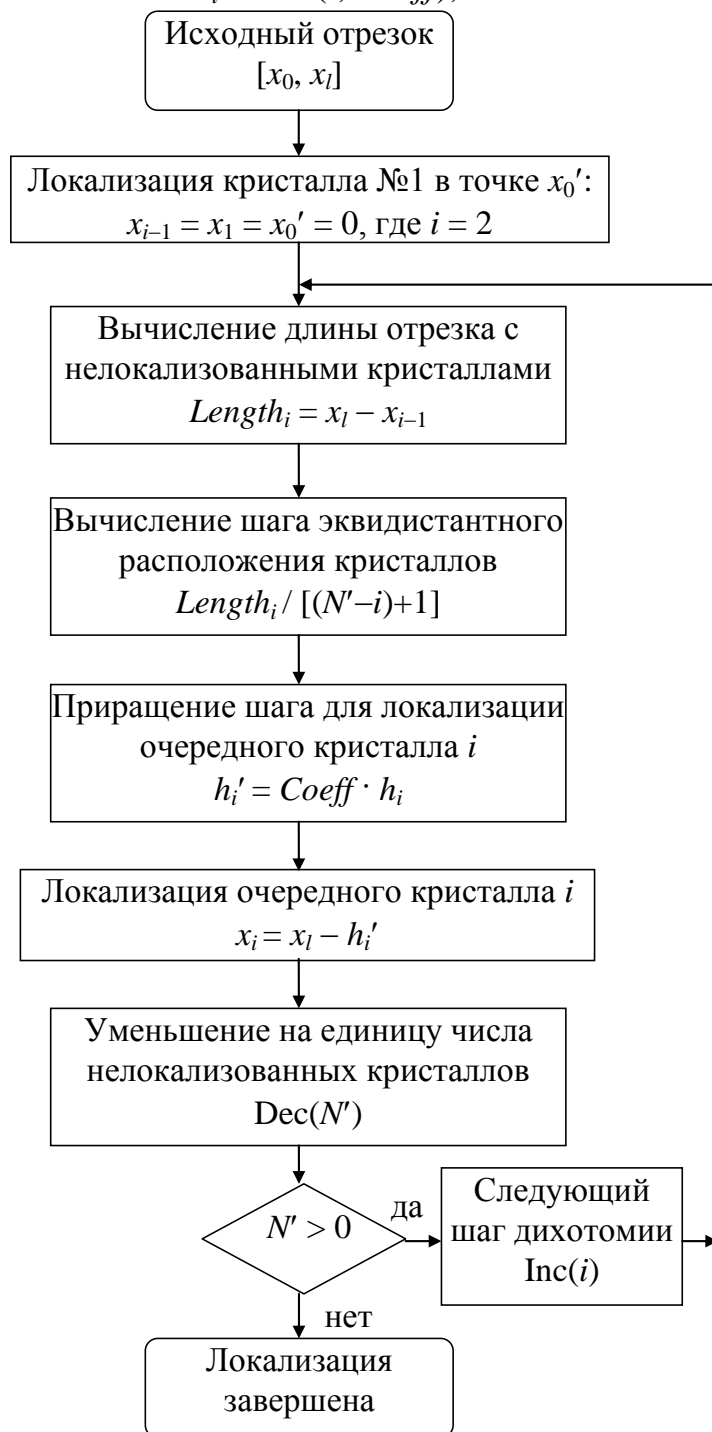


Рисунок 2 – Алгоритм дихотомии

где i – номер кристалла;
 $i \in [2; N']$;
 $Coeff$ – коэффициент дихотомии;
 $Coeff \in [1, 1 \dots 2, 0]$.

Реализация метода дихотомии предполагает многократные циклические действия. Исходя из этого, целесообразно представить этот процесс в виде алгоритма действий (рисунок 2). Ключевой момент алгоритма – контроль за количеством нелокализованных кристаллов на половинной длине подложке. Если количество нелокализованных кристаллов отлично от нуля, то реализуется очередной цикл дихотомии с вычислением координаты размещения i -ого кристалла подложки. Если количество нелокализованных кристаллов равняется нулю, то циклический процесс размещения кристаллов завершается. Визуально метод дихотомии при локализации кристаллов на подложке можно представить в виде итерационного перераспределения местоположения кристаллов (рисунок 3). Изначально расстояния между кристаллами равны h . Затем каждая итерация устанавливает новый шаг h_i и соответствующую координату локализации кристалла.

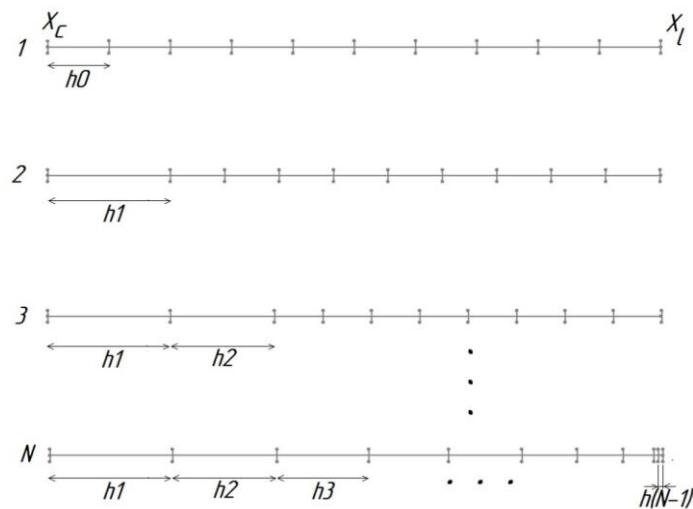


Рисунок 3 – Иллюстрация процесса локализации кристаллов

Представленная функция может быть использована для повышения термостабильности при проектировании светодиодных модулей различной мощности и назначения. Равномерный температурный профиль позволяет снизить абсолютную величину максимальной температуры в частности ФСНМ, и всей конструкции осветительного прибора в целом. Такой эффект позволяет не только повысить надёжность устройства. Одним из немаловажных критериев оценки качества источника искусственного освещения является коррелированная цветовая температура. В случае, когда используется массив светодиодных кристаллов, коррелированная цветовая температура может значительно отличаться по длине ФСНМ, так как этот параметр также зависит от температуры кристалла.

В **третьей главе** представлены результаты компьютерного моделирования светодиодного модуля с вариантами конструкции подложки, позволяющими увеличить эффективную площадь рассеяния тепловой энергии, а также результаты экспериментальных исследований. Первым шагом в исследовании было определение температурного режима исходного модуля с основанием, выпол-

ненным из никелированной стали толщиной 0,42 мм, длиной 35 мм, шириной 1 мм (образец №1). Следующим шагом проведено моделирование ФСНМ с увеличенной толщиной, при этом толщина подложки-основания составила 0,84 мм для образца № 2, и 2 мм для образца № 3. С целью определения зависимости максимальной температуры и распределения температурного поля ФСНМ от площади поверхности модуля также была построена модель, представленная на рисунке 4. Основание ФСНМ в виде радиатора с оребрением. Рёбра радиатора предназначены для увеличения площади рассеяния тепловой энергии, однако, в связи с особенностями производства ФСНМ имеются технологические ограничения, не позволяющие изготовить рёбра произвольных размеров. Толщина подложки составляет 2 мм, длина 35 мм, ширина 1 мм. Параметры рёбер: количество – 28 штук, толщина – 0,5 мм, высота – 1,5 мм, частота следования – 1 мм (образец № 4). Благодаря такой конструкции удалось увеличить площадь поверхности подложки до 257,5 мм² при площади поверхности образца № 3, равной 214 мм². Увеличение площади поверхности составило 20,3 %.

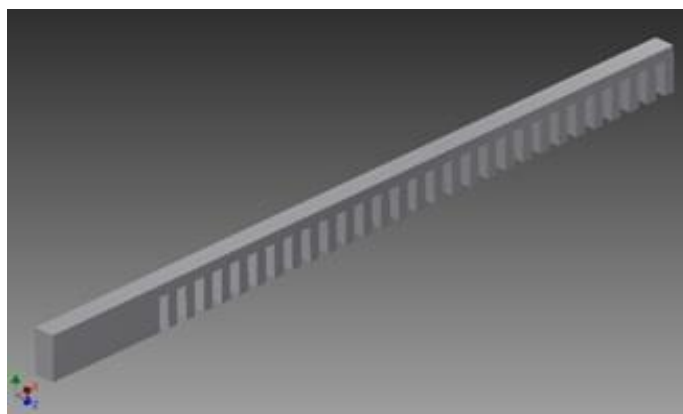


Рисунок 4 – Подложка с увеличенной площадью поверхности

Для расчета температурного режима ФСНМ, трёхмерные модели, созданные на предыдущем этапе, импортируются в систему инженерного анализа Autodesk Simulation CFD (лицензия для учебных заведений). В программе задаются параметры материалов, граничные и начальные условия, масштаб сетки, необходимый для расчета методом конечных элементов, а также условия естественной конвекции. На этапе инженерного расчета реализована возможность изменения материала подложки, для каждой конструкции было выбрано 2 материала – никелированная сталь и алюминий. Увеличение площади за счет создания рёбер на основании ФСНМ анализировалось только при толщине основания 2 мм, в силу того, что изготовление при меньших толщинах представляется затруднительной технологической задачей.

Максимальные температуры подложек с различными геометрическими параметрами приведены в таблице 1. На рисунке 5 изображено распределение температурного поля ФСНМ для случаев, соответствующих пунктам таблицы 1.

Анализируя данные, представленные в таблице 1, нетрудно заметить, что при увеличении толщины металлической подложки-основания ФСНМ, максимальная температура убывает по линейному закону. Также необходимо отметить, что использование в качестве материала подложки алюминия, позволяет снизить максимальную температуру, тем самым улучшить температурный режим при любых толщинах и конфигурациях. Так, увеличив толщину подложки до 2 мм и используя алюминий, можно снизить максимальную температуру ФСНМ на 27,4 %.

Таблица 1 – Изменения температуры ФСНМ

№	Геометрические параметры, толщина основания	Максимальное значение температуры модуля, °С (изменение, %)	
		Никелированная сталь	Алюминий
1	Исходный модуль, 0,42 мм	118 (0)	108,7 (-7,9) *
2	Исходный модуль, 0,84 мм	104 (-11,9)	96,7 (-18)
3	Исходный модуль, 2 мм	90,5 (-23,3)	85,6 (-27,4)
4	Модуль с увеличенной площадью, 2 мм	101 (-14)	93,2 (-21)

Установлено, что для снижения температуры ФСНМ рекомендуется в качестве материала основания использовать алюминий, а также увеличить толщину основания до максимальных значений, ограниченных технологическими возможностями и экономическими показателями. Также возможна разработка вариантов конструкции, позволяющих обеспечить более эффективный теплоотвод от светодиодных кристаллов.

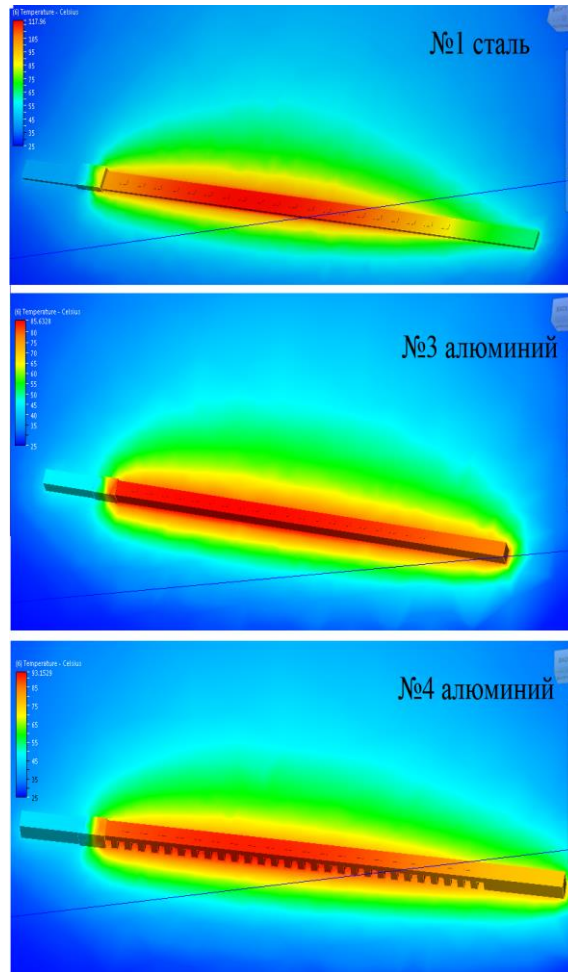


Рисунок 5 – Распределение температурного поля

Для подтверждения результатов математического и компьютерного моделирования построена измерительная установка, функциональная схема которой представлена на рисунке 6, а внешний вид на рисунке 7.



Рисунок 6 – Структурная схема измерительной установки

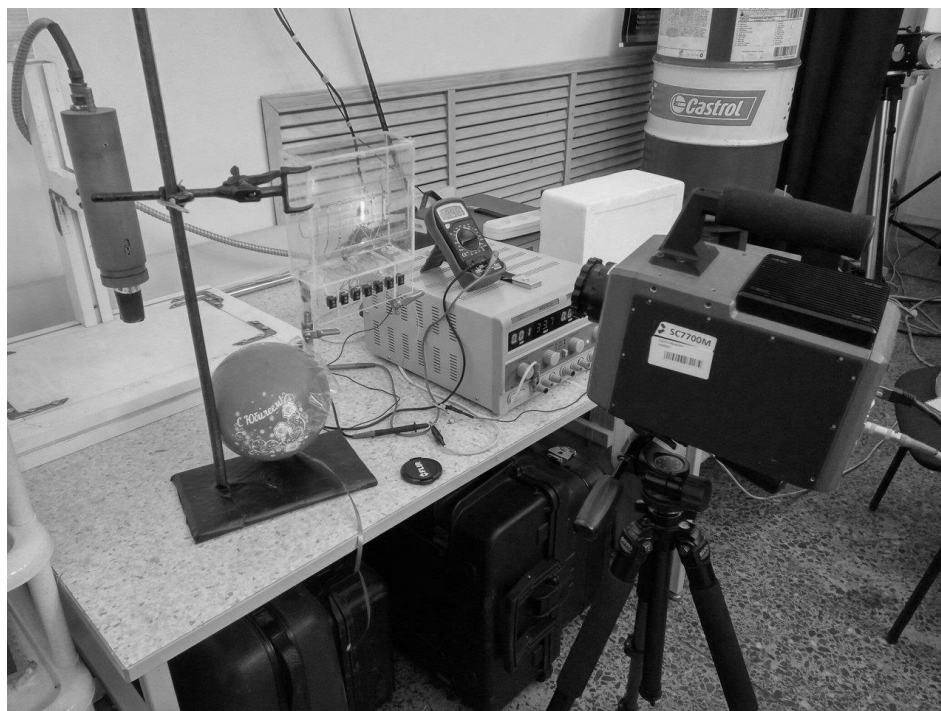


Рисунок 7 – Внешний вид измерительной установки

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 8 – 11. Установлено, что вдоль главной оси ФСНМ возникает температурный градиент, величина которого достигает $519\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$, а также подтвержден полезный эффект метода дихотомии. Применение метода позволило повысить на порядок равномерность температурного профиля и снизить максимальную температуру конструкции на $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, что составляет 16 % по сравнению с исходным образцом.



Рисунок 8 – Температурное поле ФСНМ с люминофорным покрытием

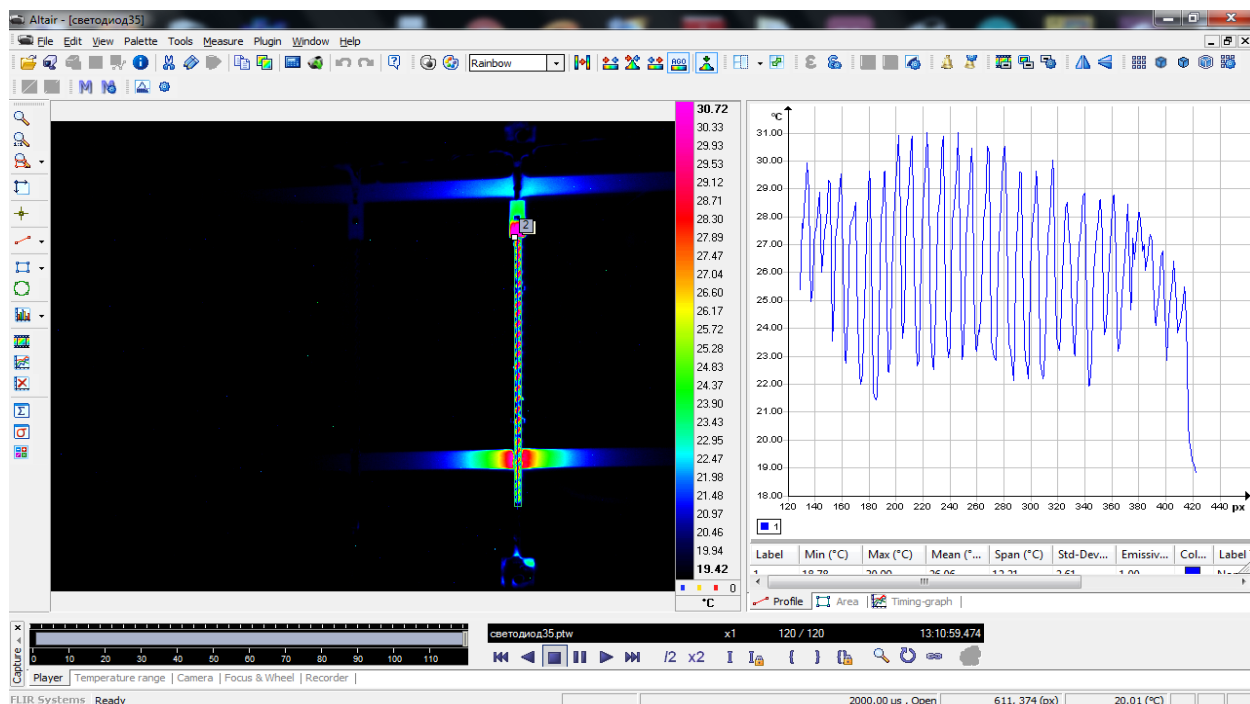


Рисунок 9 – Температурный профиль ФСНМ без люминофорного покрытия

Дополнительные исследования, подтверждающие температурные зависимости основных параметров ФСНМ, представлены на рисунках 12 – 14. Установлено, что при изменении температуры от 0 °С до 90 °С вольт-амперная характеристика ФСНМ сдвигается в сторону уменьшения напряжения. Разница в напряжении между крайними значениями температуры составляет 3 В (рисунок 12, а). Яркость ФСНМ снижается на 11%, доминирующая длина волны при фиксированном прямом токе ФСНМ линейно возрастает от 451 нм до 456 нм.

Таким образом, открывается перспектива производства светодиодных светоизлучающих нитевидных модулей оригинальной конструкции с параметрами, значительно превышающими зарубежные аналоги. Особенно важен тот факт, что в Томске планируется организация собственного производства.

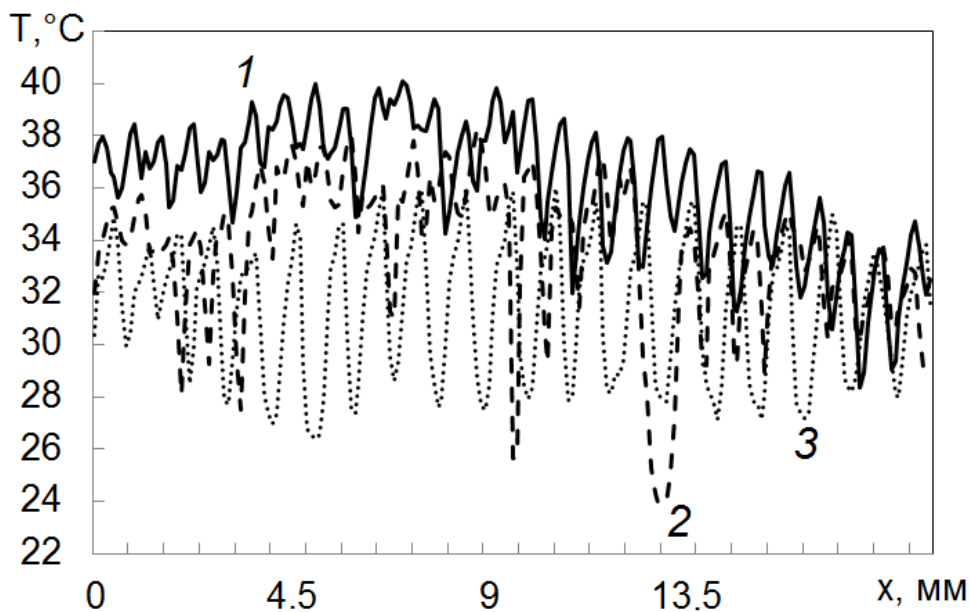


Рисунок 10 – Сравнение температурных профилей с локализацией кристаллов:
 кривая 1 – $I = 5$ мА, $Coeff = 1,0$; кривая 2 – $I = 5$ мА, $Coeff = 1,0$;
 кривая 3 – $I = 5$ мА, $Coeff = 1,5$.

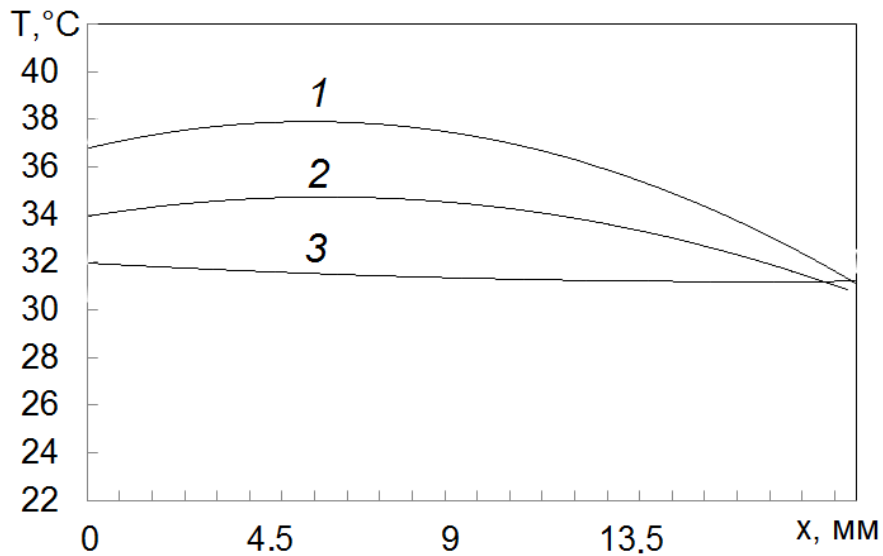


Рисунок 11 – Результат аппроксимации графиков на рисунке 8.

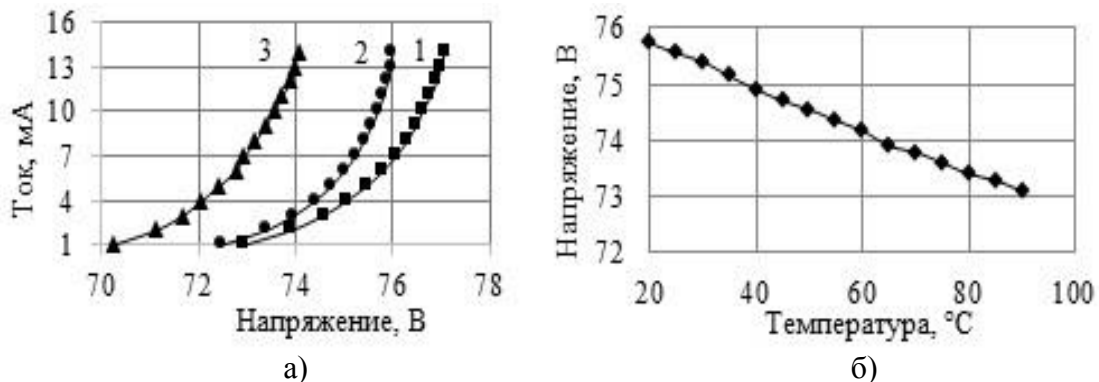


Рисунок 12 – ВАХ при разных значениях температуры (а) и температурная зависимость напряжения при значении прямого тока 10 мА (б).

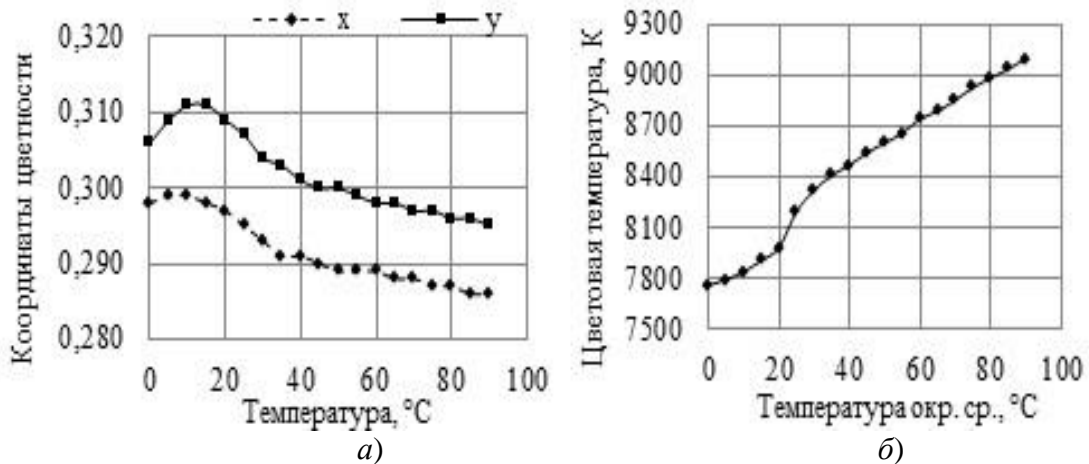


Рисунок 13 – Зависимость цветковых координат (а) и коррелированной цветовой температуры (б) от температуры окружающей среды.

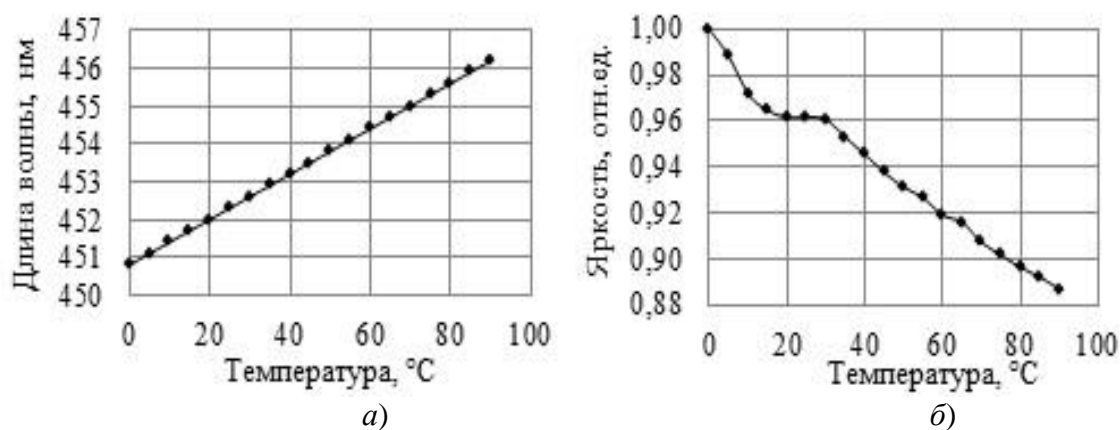


Рисунок 14 – Температурная зависимость доминирующей длины волны (а) и температурная зависимость яркости (б) при значении прямого тока 10 мА.

Разрабатываемая продукция выдержит патентную чистоту и будет весьма востребована. Также немаловажным является факт возможности создания более высоковольтного ФСНМ при неизменном температурном режиме и в той же колбе. При необходимом значении напряжения ФСНМ возможно создание линейного устройства питания, разрешающего множество вопросов, связанных с электромагнитной совместимостью, коэффициентом полезного действия и другими.

Основные результаты и выводы

В проведенном диссертационном исследовании представлен новый метод локализации линейного массива источников тепловой энергии – светодиодных кристаллов на основании, позволяющий улучшить стабильность световых характеристик филаментных светодиодных нитевидных модулей за счет минимизации кривизны температурного профиля. Описанный метод также может служить основой для разработки новых термостабильных электронных устройств.

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты.

1. На основе анализа экспериментальных данных показано, что в стационарном тепловом режиме в филаментных светодиодных нитевидных модулях возникает градиент температуры вдоль длины основания ФСНМ – температурный профиль. Градиент температуры возникает по следующим основным причинам:

- а) конечное значение коэффициента теплопроводности основания (в зависимости от материала $\lambda = 15 \dots 30$ Вт/(м·К));
- б) неодинаковыми граничными условиями теплообмена применительно к каждой грани основания;
- в) сосредоточенным расположением источников тепла на основании.

2. Показано, что сосредоточенные источники тепла на основании (светодиодные кристаллы) 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

$$T_{п.с} \sim \frac{1}{T_m}.$$

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

4. Проведено экспериментальное исследование трех образцов светодиодных нитевидных модулей, из которых два образца имеют эквидистантное расположение кристаллов, а третий образец обладает локализацией кристаллов с коэффициентом дихотомии $Coeff = 1,5$. Результаты экспериментальных исследований позволяют утверждать: применение локализации кристаллов 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).

Основные публикации по теме диссертации

Работы, опубликованные в ведущих рецензируемых журналах:

1. Старосек Д.Г. Обеспечение температурной стабильности ламп с ультратонкими светодиодными нитями / Д.Г. Старосек, Д.В. Озёркин // В мире научных открытий. - 2015. - № 12.3 (72).

2. Озёркин Д.В. Топологическая термокомпенсация светодиодных линейных модулей филаментных ламп / Д.В. Озёркин, Д.Г. Старосек, В.И. Туев // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2018. - Т. 61, № 6. - С. 156-163.

Патенты:

1. Пат. 172287 РФ, МПК F 21 K 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.

2. 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.

Публикации в журналах, индексируемых базами Web of Science, SCOPUS:

1. Investigation of temperature regime and luminous flux of light-emitting element of light emitting diode lamp / D.G. Starosek, D.V. Ozerkin, V.I. Tudev, Y.V. Ryapolova, A.U. Olisovets, A.V. Ermolaev // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2015. – P. 6944–6948.

2. 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.

3. LED Lamp Design Optimizing on Minimum Non-Uniformity of Light Intensity Distribution in Space / K.N. Afonin, A.Y. Olishovets, 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, p. 2. – pp. 153–156.

4. Fundamental problem of heat transmission in the closed volume of inert gas / D. Starosek, A. Khomyakov, D. Ozerkin, V. Tuev, A. Chulkov // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Tomsk). – 2019. – P. 1–5.

Материалы международных и всероссийских конференций:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Афонин К.Н. Срок службы светодиодных ламп / К.Н. Афонин, Ю.В. Ряполова, Д.Г. Старосек [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://conf-prfn.org/Arch/Proceedings_2016_vol_7.pdf, свободный (дата обращения 15.07.2019).

5. 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.

6. 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.

7. 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.