

УТВЕРЖДАЮ

Директор Ульяновского филиала
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
радиотехники и электроники им. В.А.
Котельникова Российской академии наук,
д.т.н., профессор



В.А. Сергеев

« 02 » 12 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Старосека Данила Геннадьевича «Стабилизация теплового и электрического режимов в нитевидных модулях светоизлучающих GaN/InGaN диодов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника»

Актуальность работы

Диссертационная работа Старосека Д.Г. посвящена исследованию нитевидных модулей светоизлучающих GaN/InGaN диодов с целью улучшения их тепловых и электрических характеристик путем совершенствования конструкции. Нитевидные (филаментные) светоизлучающие модули лежат в основе современных светоизлучающих приборов бытового и производственно-технического назначения.

Обычная конструкция таких модулей представляет собой линейный ряд светоизлучающих GaN/InGaN диодов, эквидистантно закрепленных на тонком металлическом основании по технологии кристалл-на-плате. Подобное решение не является оптимальным с точки зрения теплового режима работы. Помимо этого, к таким устройствам предъявляются всё более серьёзные требования, связанные с энергоэффективностью, эмиссией электромагнитных помех, стабильностью цветовой коррелированной температуры, сохраняемости уровня светового потока и многие другие. Указанные требования приводят к необходимости создания нитевидного модуля на основе светоизлучающих GaN/InGaN диодов с высокими показателями электрических и тепловых характеристик. Таким образом, исследование физических процессов в светодиодных приборах на основе нитевидных модулей с целью разработки конструкции с улучшенными тепловыми и электрическими характеристиками является актуальным.

Цель работы заключалась в повышении стабильности электрических и тепловых режимов светодиодного источника света на основе нитевидных модулей GaN/InGaN диодов с конвекционным газовым охлаждением, которая достигается за счёт минимизации среднеквадратического отклонения рабочих температур кристаллов GaN/InGaN светодиодов в конструкции нитевидного светоизлучающего модуля.

Научная новизна диссертации заключается в том, что для нитевидных модулей светоизлучающих GaN/InGaN диодов впервые:

1. Проведено исследование электрических и тепловых характеристик, установлены зависимости электрических характеристик от условий теплоотвода и неоднородности распределения температуры.

2. Предложена целевая функция локализации кристаллов на подложке с целью минимизации среднеквадратического отклонения рабочих температур светодиодов.

3. Показана возможность применения метода дихотомии для автоматизации размещения кристаллов светодиодов в соответствии с целевой функцией локализации.

4. Предложен комплексный метод повышения температурной стабильности светоизлучающего прибора на основе нитевидных модулей. Предложена конструкция твердотельного источника света с улучшенным температурным режимом.

Научная и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработанные конструктивно-технологические рекомендации по изготовлению нитевидных светодиодных источников света с конвекционным газовым охлаждением внедрены на производстве 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 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.

Положения, выносимые на защиту полностью отражают научную новизну и практическую значимость исследования.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается использованием общепринятых методов исследования, стандартных пакетов программ численного моделирования, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании и исследовании нитевидного модуля светоизлучающих GaN/InGaN диодов.

Полнота изложения материалов диссертации в печатных работах, опубликованных автором

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.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Структура и содержание 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.

Во **введении** обосновывается актуальность, формулируется цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, излагаются научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу известных из литературы сведений об особенностях исследования и обеспечения тепловых режимов в светодиодных устройствах, проведен обзор математических методов моделирования вышеописанных процессов. Анализ научно-технической литературы показал, что тепловые процессы, протекающие в конструкции объекта исследований, существенно отличаются от процессов в осветительных устройствах на основе корпусированных светодиодов, изготовленных по технологии поверхностного монтажа, так как в нитевидном модуле светодиодные кристаллы располагаются непосредственно на тонкой подложке по технологии кристалл-на-плате, а их охлаждение осуществляется, главным образом, за счёт конвективных потоков газа внутри колбы, а не теплопроводности в радиаторе традиционного светодиодного осветительного прибора.

Вторая глава посвящена математическому моделированию процесса теплообмена в линейном массиве светоизлучающих GaN/InGaN диодов, а также приведен численный метод решения построенной модели. Показано, что рабочие температуры светодиодных кристаллов в середине подложки существенно больше, чем на краях, и для улучшения эксплуатационных параметров нитевидных светоизлучающих модулей с конвекционным газовым охлаждением необходимо обеспечить выравнивание температурного профиля. Для выравнивания температурного профиля по длине подложки автором предложено неэквидистантное расположение светодиодных кристаллов, и задача выравнивания температурного профиля сведена к нахождению целевой функции локализации кристаллов на подложке с целью минимизации среднеквадратического отклонения. Реализация метода дихотомии предполагает многократные циклические действия. Предложенная функция может быть использована для повышения термостабильности при проектировании светодиодных модулей различной мощности и назначения. Как показано в работе, выравнивание температурного профиля позволяет снизить абсолютную величину максимальной температуры модуля и всей конструкции осветительного

прибора, что повышает надежность и равномерность коррелированной цветовой температуры.

В **третьей главе** представлены результаты компьютерного моделирования светодиодного модуля с различными вариантами конструкции подложки, позволяющими увеличить эффективную площадь рассеяния тепловой энергии, а также результаты экспериментальных исследований. Для подтверждения результатов моделирования создана измерительная установка. Установлено, что вдоль главной оси стандартного нитевидного модуля светоизлучающих GaN/InGaN диодов возникает температурный градиент величиной до 519 °С/м. Экспериментально подтверждено, что применение метода дихотомии позволило повысить на порядок равномерность температурного профиля и снизить максимальную температуру конструкции на 6 °С (16 %) по сравнению с исходным образцом.

В **заключении** приведены основные результаты работы. Список цитируемой литературы содержит обширную и достаточную библиографию по тематике диссертации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные Д.Г. Старосеком в процессе диссертационного исследования результаты и выводы можно рекомендовать для использования в таких организациях как: Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов (г. Томск); ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Мордовский государственный университет им. Огарева (г. Саранск); Российский технологический университет МИРЭА (г. Москва); УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и других научных организациях и вузах России.

Замечания по диссертационной работе:

1. Экспериментальное исследование температурного профиля выполнено на трех образцах, два из которых имеют эквидистантное расположение светодиодов, и один образец - локализованное. Из текста диссертации не ясно, в чем различие первых двух образцов, которые, согласно рис. 3.22, имеют явно различающийся температурный профиль.

2. В диссертации не приведена геометрия образца филаментной светодиодной нити с локализованным расположением светодиодов.

3. Термин «стабилизация» в названии диссертации не совсем соответствует содержанию работы, которая посвящена улучшению (выравниванию) электрических и тепловых характеристик нитевидных модулей GaN/InGaN диодов.

4. Вывод о том, что амплитуда перепадов температуры в нитевидных светодиодных модулях находится в обратно пропорциональной зависимости с уровнем постоянной составляющей температурного профиля, является недостаточно обоснованным, так как образцы исследовались при одном токовом режиме работы и выборка образцов не является представительной.

5. В оформлении диссертации и автореферата найдены неточности и недостатки: в разделе «Личный вклад автора» автореферата и диссертации

непонятно, о каком отчете и его разделах идет речь; стр. 29 диссертации, формула (1.2) не корректно написана; в тексте диссертации одним и тем же символом α обозначаются разные величины (стр. 37 - коэффициент тепловой диффузии; стр. 58 - коэффициент теплоотдачи конвекцией; стр.67 - температурный коэффициент); текст диссертации изобилует аббревиатурами; в обзорной части диссертации не на все приведенные рисунки есть ссылки на источники (в частности на рис. 1.10 и 1.11).

Представленные замечания, тем не менее, не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертационная работа Старосека Д.Г. содержит значимые научные результаты по специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

В целом, диссертационная работа Старосека Д. Г. является законченным исследованием, в котором решена актуальная задача улучшения температурного режима в нитевидных модулях светоизлучающих GaN/InGaN диодов. По объему и научному уровню полученных результатов диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Старосек Данил Геннадьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании секции Ученого совета УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 27 ноября 2019 года, протокол № 10.

Ученый секретарь, к.т.н.
УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
Тел.: (842) 244-29-96
E-mail: a-tchertor@yandex.ru

А.А. Черторийский

Старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
Тел.: (842) 244-29-96
E-mail: ln23al@yandex.ru

А.М. Ходаков

Старший научный сотрудник, к.т.н.
УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
Тел.: (842) 244-29-96
E-mail: ilya-frolov88@mail.ru

И. В. Фролов

Адрес: 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2, Ульяновский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).