

Определение температуры кристаллов InGaN-светодиодов в матрице с высокой плотностью мощности излучения

А. В. Данильчик^а, А. Г. Войнилович^а, Н. В. Ржеуцкий^а, П. В. Шпак^а, Е. В. Лебедев^а,
В. В. Борушко^б, Ю. В. Трофимов^в, В. И. Цвирко^в, Е. В. Луценко^а, Г. П. Яблонский^а

^а *Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь;*
e-mail: a.danilchuk@ifanbel.bas-net.by

^б *Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина, Брест, Беларусь*

^в *Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

Разработаны и созданы матрицы светодиодов с высокой плотностью мощности излучения на основе миниатюрных светодиодов Rebel Z-серии с плотной посадкой на печатную плату с алюминиевым основанием. Плотность мощности излучения матрицы, состоящей из 33 излучающих в сине-зеленой области светодиодов, составляла ~ 18 Вт/см² при постоянном токе инжекции 1 А. Создана модель, описывающая распределение тепла при работе матрицы в зависимости от подаваемой на светодиоды электрической мощности. Показано, что результаты моделирования соответствуют результатам измерений температуры матрицы.

Ключевые слова: матрица светодиодов, температура активной области.

Введение

Создание светодиодных модулей с высокой плотностью мощности излучения предполагает использование светодиодов (СД) малых размеров с низким тепловым сопротивлением [1]. Матрицы современных СД могут иметь суммарную мощность излучения, достаточную для накачки активных лазерных сред [2]. Использование в лазерах гибридной поперечно-продольной полихроматической накачки в перспективе позволит создать мощные твердотельные лазеры с высоким качеством лазерного пучка [3]. Кроме того, матрицы СД могут применяться в качестве мощных источников света, например, при высокоскоростной видеосъемке. Одним из важнейших параметров, влияющих на эффективность и срок службы СД, является температура активной области. Однако определение температуры активных областей большого количества СД, расположенных плотно на монтажной плате, представляет значительные трудности.

Эксперимент и моделирование

Создана светодиодная матрица 1.5×0.5 см², которая представляет собой набор 33 СД, посаженных методом поверхностного монтажа на плату с алюминиевым основанием. Используются СД марки Rebel LXZ1-PE01-0048 [4], излучающие на длине волны ~ 500 нм и соединенные электрически последовательно. Питание СД осуществлялось непрерывным током от 1 до 1000 мА. Площадь основания таких СД 2.2 мм². Стабилизация температуры основания матрицы осуществлялась с помощью температурного контроллера мощностью 60 Вт и элемента Пельтье. Такая система стабилизации температуры эффективна только до тока 200 мА, что обусловлено как недостаточной мощностью контроллера, так и малыми размерами охлаждаемой матрицы в сравнении с площадью охлаждающего элемента, которая составляет 4×4 см². Для стабилизации температуры основания матрицы СД при больших токах инжекции использован или радиатор охлаждения с тепловым сопротивлением ~ 0.08 К/Вт, или медный водоблок, охлаждаемый проточной водой.

Разработана математическая модель, описывающая матрицу 33 СД Rebel LXZ1-PE01-0048. Данная модель состоит из следующих элементов: алюминиевого основания, слоя диэлектрика, островков медной металлизации, слоя припоя (паяльной пасты), корпусов СД и активных областей СД. Модель учитывает физические свойства материалов, размеры элементов и позволяет рассчитать распределение температуры в стационарном режиме для известной объемной плотности мощности, которая определяется как отношение электрической мощности, подаваемой на СД и идущей на его разогрев $P_{\text{нагр}}$, к объему активной области светодиодных кристаллов. Площадь кристаллов 1×1 мм², толщина активной области принята равной 10 мкм, таким образом, объем активной области $V_{\text{акт. обл.}} = 10^{-11}$ м³. Также в данной модели учтены тол-

шины слоев и тепловые сопротивления всех материалов, которые соответствуют справочным данным. Система уравнений теплопроводности для определения распределения температуры разогрева матрицы СД решена методом конечных элементов. В качестве источников тепла выступали верхние слои СД, собственно кристаллы. Граничные условия заданы таким образом, что температура основания алюминиевой платы принималась за постоянную величину $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, моделируя условия стабилизации температуры, а все остальные поверхности задавались как термоизолированные.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 (вставка) представлена фотография созданной матрицы СД. При токе 1 А потребляемая матрицей СД электрическая мощность ~ 100 Вт. Оптическая мощность излучения СД $P_{\text{опт}}$ в зависимости от тока инжекции измерена с помощью интегрирующей сферы. Зависимость КПД СД η от тока представлена на рис. 1, где также приведена зависимость плотности мощности излучения I матрицы СД от тока инжекции при стабилизации температуры алюминиевого основания при $20\text{ }^\circ\text{C}$. Максимальная плотность мощности излучения 18 Вт/см^2 достигнута при токе 1 А, при этом КПД СД $\eta = 13.4\%$.

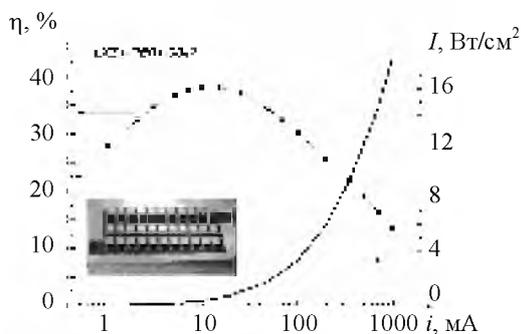


Рис. 1. Зависимость плотности мощности излучения I и КПД η матрицы светодиодов от тока инжекции; на вставке — фотография матрицы светодиодов.

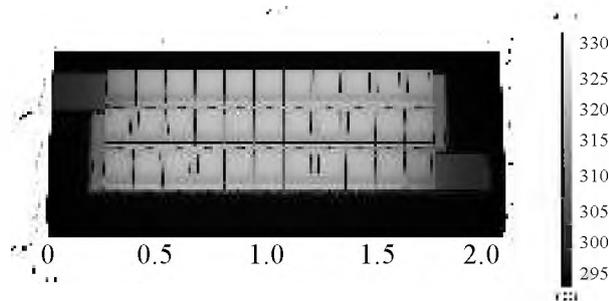


Рис. 2. Результаты моделирования распределения тепла в матрице светодиодов при токе инжекции 350 мА.

На основании измерений оптической мощности и вольт-амперной характеристики рассчитана мощность $P_{\text{нагр}}$, которая шла на нагрев активной области СД, как разность между потребляемой электрической мощностью и мощностью излучения. На рис. 2 приведены результаты моделирования распределения тепла в матрице СД при объемной плотности мощности нагрева $7.86 \times 10^{10}\text{ Вт/м}^3$ в приближении отсутствия существенных градиентов температуры внутри СД. Данное значение плотности мощности тепла получено как отношение $P_{\text{нагр}}$ при токе 350 мА к $V_{\text{акт.обл}}$. Как видно, максимальный нагрев составляет 332 К. Однако следует отметить, что такая температура достигается в СД, расположенных в середине структуры, при том что расположенные на краях СД испытывают меньший нагрев. Такое поведение обусловлено наличием на краях матрицы дополнительных площадок медной металлизации, которые отводят тепло от корпусов СД.

Также проведены расчеты распределения температуры в матрице для объемных плотностей мощности, которые соответствуют токам инжекции 500 и 1000 мА. Полученные зависимости максимальных температур нагрева светодиодных кристаллов от плотностей мощности представлены на рис. 3 (кривая 2). Для непосредственного определения температуры на поверхности матрицы СД использован стационарный тепловизор FLIR A655sc [5]. На рис. 3 представлены результаты измерений температуры матрицы тепловизором (кривая 1) в зависимости от тока инжекции. На рис. 4 показано изображение, полученное с помощью FLIR A655sc, для тока инжекции 350 мА. Курсорами 1—4 обозначены точки, в которых измерялись температуры T_1 — T_4 : $T_1 = 59.1\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 59.2\text{ }^\circ\text{C}$, $T_3 = 56.8\text{ }^\circ\text{C}$, $T_4 = 64.4\text{ }^\circ\text{C}$. Для определения температуры выбирались кристаллы СД, расположенных на краю и в центре матрицы. Температура на поверхности матрицы светодиодов зависит от расположения СД и варьирует от $T_3 = 56.8\text{ }^\circ\text{C}$ до $T_4 = 64.4\text{ }^\circ\text{C}$.

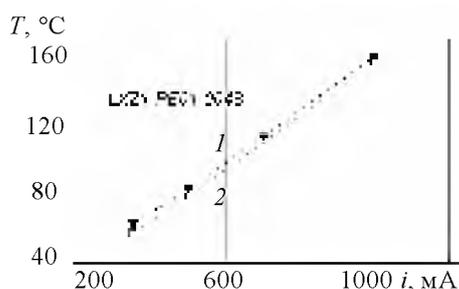


Рис. 3. Измеренные тепловизором (1) и полученные в результате расчетов (2) температуры нагрева матрицы светодиодов в зависимости от тока инжекции.

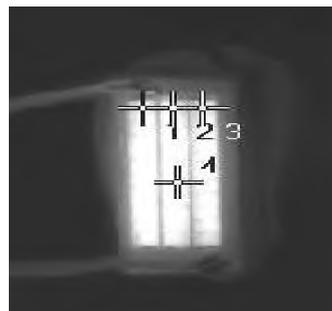


Рис. 4. Изображение матрицы светодиодов при токе инжекции 350 мА, полученное с помощью тепловизора;

Как видно из рис. 3 и 4, рассчитанные температуры нагрева СД в матрице (кривая 2) практически идентичны полученным при непосредственных измерениях на различных областях матрицы СД. Это свидетельствует о хорошем соответствии разработанной модели и высокому качеству изготовленной матрицы СД.

Заключение

Разработан и изготовлен макет светодиодного модуля из 33 светодиодов, излучающий в зеленой области спектра. Максимальная оптическая мощность излучения светодиодной матрицы 13.8 Вт при токе инжекции 1 А, что соответствует плотности мощности $\sim 18 \text{ Вт/см}^2$. Создана модель, описывающая распределение тепловых потоков в матрице светодиодов. Показано, что температуры кристаллов светодиодов в модели близки к полученным при непосредственных измерениях тепловизором.

Литература

1. www.eetimes.com/design/smart-energy-design/4238275/Liquid-cooled-LED-arrays-as-bright-as-30-headlights?pageNumber=0
2. K. Lee. J. Korean Phys. Soc. 2011. V. 59. P. 3239—3245.
3. Е.В. Луценко. *Характеристики инжекционных лазеров видимого диапазона спектра и их возможные применения*. Тез. докл. 4-й Всерос. симпозиума с международным участием “Полупроводниковые лазеры: физика и технология”, 10—13 ноября 2014 г. СПб, Россия. С. 40.
4. www.philipslumileds.com/uploads/375/DS105-pdf
5. E. V. Lutsenko. Annual Proceedings the Technical University of Varna 2010. International Scientific and Applied Conference Opto-Nano Electronics and Renewable Energy Sources 2010. Proceedings, p 38-42. ISSN 1312-1839. 21—25 September 2010, St. Constantine and Helena Resort, Varna, Bulgaria
6. www.flir.com/WorkArea/linkit.aspx?LinkIdentifier=id&ItemID=30801&libID=39364

Determination of Crystal Temperature of InGaN LEDs in Matrix with High Emission Power Density

A. V. Danilchyk^a, A. G. Vainilovich^a, M. V. Rzhetski^a, P. V. Shpak^a, E. V. Lebiadok^a, V. V. Borushko^b, Y. V. Trofimov^c, V. I. Tsvirko^c, E. V. Lutsenko^a, G. P. Yablonskii^a

¹ B. I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: a.danilchyk@ifanbel.bas-net.by

² Brest State University by A. S. Pushkin, Brest, Belarus

³ Center of LED and Optoelectronic Technologies, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

To create a matrix with high-density of radiation miniature light-emitting diodes (LEDs) Rebel Z-series was used with a tight fit on the printed aluminum circuit board. Matrix, consisting of 33 LEDs, emitting in the blue-green region of the spectrum, and radiation power density was about 18 W/cm^2 at injection current of 1 A. A model describing the distribution of heat during operation of the matrix was created. It is shown that the results of measurements of the temperature of the matrix of LEDs using a thermal imager are consistent simulation results and measurements of the temperature of the *p-n*-junction LED performed by optical method.

Keywords: matrix light emitting diode, temperature of the active region.