

УДК 538.958

*А. В. ДАНИЛЬЧИК¹, А. Г. ВОЙНИЛОВИЧ¹, Н. В. РЖЕУЦКИЙ¹, П. В. ШПАК¹, В. В. БОРУШКО²,
Ю. В. ТРОФИМОВ³, В. И. ЦВИРКО³, Е. В. ЛУЦЕНКО¹, Г. П. ЯБЛОНСКИЙ¹*

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В МАТРИЦЕ InGaN СВЕТОДИОДОВ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

¹*Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: a.danilchuk@ifanbel.bas-net.by*

²*Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина, Брест, Беларусь,
e-mail: vadim79@tut.by*

³*Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь; e-mail trofimov@inel.bas-net.by*

Создана матрица, состоящая из 33 миниатюрных светодиодов Rebel Z-серии, излучающих в сине-зеленой области спектра. Максимальная плотность мощности излучения матрицы составила ~ 18 Вт/см² при непрерывном токе инжекции. Выполнена компьютерная модель, описывающая распределение температуры в матрице светодиодов в зависимости от потребляемой электрической мощности. Результаты моделирования согласуются с результатами измерений температуры светодиодов матрицы при помощи тепловизора, а также определения температуры активной области светодиодов оптическим методом.

Ключевые слова: матрица светодиодов, температура активной области, распределение температуры, тепловая модель.

*A. V. DANILCHYK¹, A. G. VAINILOVICH¹, M. V. RZHEUTSKI¹, P. V. SHPAK¹, V. V. BORUSHKO²,
Y. V. TROFIMOV³, V. I. TSVIRKO³, E. V. LUTSENKO¹, G. P. YABLONSKI¹*

SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE InGaN LED MATRIX WITH HIGH DENSITY OF RADIATION POWER

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

²*Brest State University named after A. S. Pushkin, Brest, Belarus; e-mail: vadim79@tut.by*

³*Center of LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus; e-mail: trofimov@inel.bas-net.by*

The matrix consisting of 33 miniature LEDs of Rebel Z-series emitting in the blue-green region of the spectrum was created. The maximum emission power density of the matrix was ~ 18 W/cm² at continuous injection current. A computer model describing the temperature distribution in the matrix of LEDs depending on the supplied electrical power was developed. The simulation results are consistent with the results of measurement of the matrix LEDs temperature by a thermal imager, as well as with the results of determination of the LED active region temperature by the optical method.

Keywords: LED matrix, active region temperature, temperature distribution, thermal model.

Введение. Одним из путей улучшения характеристик мощных светодиодов (СД) является уменьшение теплового сопротивления между активной областью СД-кристалла и основанием светодиода. При этом происходит значительное уменьшение размеров корпуса СД вплоть до размеров кристалла [1]. Линейки или матрицы современных светодиодов с малой площадью поверхности могут иметь высокую суммарную интенсивность излучения, достаточную для накачки активных лазерных сред [2]. Использование в лазерах гибридной поперечно-продольной полихроматической накачки, поперечная накачка которых осуществляется светодиодами, в перспективе позволит создать мощные конкурентоспособные твердотельные лазеры с высоким качеством лазерного пучка [3]. Кроме того, матрицы светодиодов могут применяться в качестве мощных

источников света, например при высокоскоростной видеосъемке быстро происходящих событий, или в автомобилестроении.

Одним из важнейших параметров, влияющих на эффективность и срок службы светодиодов, является температура активной области. Однако определение температуры активных областей большого количества светодиодов, расположенных плотно на монтажной плате, представляет значительные трудности. Методы определения температуры, например основанные на сравнении прямого напряжения смещения на СД в импульсном режиме и в режиме постоянного тока или на сравнении длин волн электролюминесценции в импульсном режиме работы с длинами волн при непрерывном возбуждении [4], требуют для своей реализации импульсных источников тока большой мощности. Прямые методы определения температуры поверхности светодиодов с высокой точностью и пространственным разрешением требуют дорогостоящей тепловизионной техники.

Математическое моделирование и современные программные комплексы позволяют численными методами решать уравнения теплопереноса в различных средах. Разработка трехмерных (3D) цифровых моделей матриц светодиодов дает возможность проводить расчеты для изучения влияния теплофизических свойств материалов на распределение температуры внутри и на поверхности структур. Создание моделей, подробно описывающих СД и матрицы светодиодов, позволит проводить оценку температуры активной области и сравнивать полученные данные с результатами экспериментов по определению данной величины. Целью настоящей работы была апробация результатов математического моделирования распределения температуры в созданной цифровой модели матрицы светодиодов с полученными экспериментально различными методами величинами нагрева светодиодов в матрице. В дальнейшем можно будет с помощью численного моделирования проводить оценку температур нагрева матриц или линеек однотипных светодиодов, не прибегая к сложным экспериментальным исследованиям, а также разрабатывать оптимальные конструкции матриц СД.

Теоретическая модель. С целью теоретического определения температуры светодиодов была создана трехмерная цифровая модель, описывающая матрицу из тридцати трех СД Rebel LXZ1-PE01-0048, установленных методом поверхностного монтажа на плату с алюминиевым основанием (рис. 1, *а*). Данная матрица ранее была представлена в работе [5]: площадь основания отдельных светодиодов составляла всего $2,2 \text{ мм}^2$, при этом общая площадь светящейся области – $1,5 \times 0,5 \text{ см}^2$.

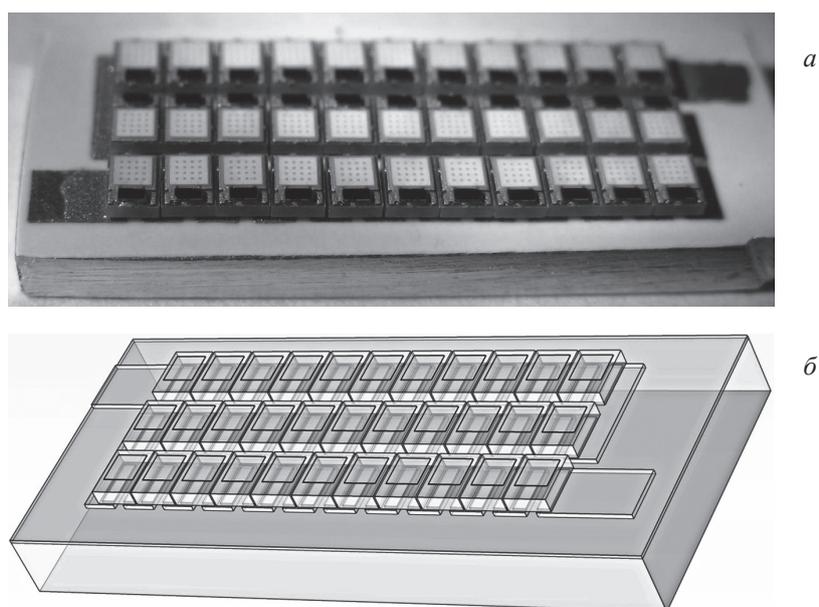


Рис. 1. Матрица светодиодов Rebel LXZ1-PE01-0048 (*а*) и ее цифровая 3D-модель (*б*)

В программной среде Comsol Multiphysics была создана 3D-модель матрицы, состоящая из следующих элементов: алюминиевого основания, слоя диэлектрика, площадки медной металлизации, слоя припоя (паяльной пасты), корпуса светодиода и активных областей светодиода. Изображение данной модели показано на рис. 1, б. Модель учитывает физические свойства материалов, размеры элементов и позволяет рассчитать распределение температуры в стационарном режиме для известной объемной плотности мощности, идущей на нагрев, которая определялась как отношение электрической мощности, подаваемой на светодиод и идущей на его нагрев $P_{\text{нагр}}$ к объему активной области светодиодного кристалла.

Площадь кристаллов отдельных светодиодов составляла $1 \times 1 \text{ мм}^2$, а толщина активной области принималась равной 10 мкм, таким образом, объем активной области $V_{\text{акт.обл.}} = 10^{-11} \text{ м}^3$. Также в данной модели учитывались геометрические размеры и тепловое сопротивление всех материалов, которые представлены в таблице (данные взяты из обширной справочной литературы).

Материал	Тепловое сопротивление, Вт/(м·К)	Толщина слоя, мкм
Кристалл светодиода, GaN	130	10
Корпус светодиода, Al ₂ O ₃	42	470
Припой, Sn ₆₀ Pb ₄₀	50	50
Контактные площадки, Cu	390	150
Диэлектрик	1,4	100
Основание монтажной платы, Al	160	2000

В указанной модели методом конечных элементов решалось уравнение распределения тепла в матрице. В качестве источников тепла выступали верхние слои светодиодов, т. е. собственно кристаллы. Граничные условия задавались таким образом, что температура основания алюминиевой платы принималась за постоянную величину $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, моделируя условия стабилизации температуры. Отток тепла через все остальные поверхности не учитывался. Сетка конечных элементов генерировалась со средними параметрами точности при минимальном размере ее элементов $3,69 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Методика эксперимента. Экспериментальное определение температуры на поверхности матрицы светодиодов проводилось при помощи стационарного научного тепловизора FLIR A655sc. Для стабилизации температуры основания матрицы светодиодов при больших токах инжекции использовался радиатор с воздушным охлаждением с низким тепловым сопротивлением $\sim 0,08 \text{ К/Вт}$, а также медный радиатор, охлаждаемый проточной водой.

Для определения температуры перегрева активной области светодиодов применялся метод, основанный на сравнении положений максимумов измеренных спектров электролюминесценции (ЭЛ) при непрерывном токе $\lambda_{\text{непр}}$ с положениями максимумов спектров ЭЛ при возбуждении короткими импульсами тока $\lambda_{\text{имп}}$ такой же величины [4, 6]. При этом импульсы тока, подаваемые на светодиод, имели длительность 500 нс и частоту повторения 1 кГц. При таких параметрах импульсного тока нагрев активной области светодиода незначителен, и с увеличением тока инжекции происходит только коротковолновое смещение положения спектров, обусловленное в основном заполнением состояний в InGaN. Из зависимости положения спектра ЭЛ светодиода от температуры при импульсном токе 100 мА получен коэффициент температурного смещения электролюминесценции $\Delta T/\Delta \lambda$. Для определения зависимости температуры перегрева активной области от тока инжекции разность положений спектров ЭЛ при непрерывном и импульсном токах $\Delta \lambda = \lambda_{\text{непр}} - \lambda_{\text{имп}}$ умножалась на коэффициент температурного смещения $\Delta T/\Delta \lambda$. В экспериментах по определению температуры перегрева активной области был использован один светодиод, который припаивался на монтажную плату с алюминиевым основанием по технологии поверхностного монтажа. Плата помещалась на элемент Пельтье, и заданная температура ее основания стабилизировалась при помощи термоконтроллера.

Для корректного определения электрической мощности, которая расходуется на нагрев светодиодов в матрице, была измерена оптическая мощность излучения $P_{\text{опт}}$ матрицы. Измерения проводились с использованием интегрирующей сферы при различных токах инжекции. Плотность

мощности излучения матрицы светодиодов от тока инжекции определялась при стабилизации температуры алюминиевого основания $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальная плотность мощности излучения составила $\sim 18\text{ Вт/см}^2$ при токе $I = 1000\text{ мА}$ и напряжении $U = 100\text{ В}$. Однако максимальная эффективность светодиодов ($\eta \sim 37\%$) достигается при очень малом токе $\sim 10\text{ мА}$. Увеличение тока инжекции до значения 1000 мА приводит к падению эффективности до величины $\eta = 13,8\%$. Резкое уменьшение эффективности светодиодов с ростом тока инжекции в литературе связывают с такими эффектами, как Оже-рекомбинация [7] или токи утечки [8]. Из данных измерений оптической мощности и вольтамперной характеристики рассчитывалась мощность, которая шла на нагрев активной области светодиодов:

$$P_{\text{нагр}} = I \cdot U - P_{\text{опт}}$$

Результаты и их обсуждение. На рис. 2, *а* представлено изображение матрицы, состоящей из тридцати трех светодиодов Rebel LXZ1-PE01-0048, полученное при помощи тепловизора FLIR. Курсорами 1–4 обозначены точки, в которых производился замер температуры. Точки 1–3 показывают температуру светодиодов, находящихся на краю матрицы, а точка 4 – температуру светодиода, находящегося в центре. Значения температуры в точках 1–4 составляют: $T_1 = 59,1\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_2 = 59,2\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_3 = 56,8\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_4 = 64,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 2, *б* приведен трехмерный график распределения температуры в модели матрицы светодиодов при объемной плотности мощности нагрева $7,86 \cdot 10^{10}\text{ Вт/м}^3$ в приближении отсутствия существенных градиентов температуры внутри светодиода. Температура на краях матрицы отличается от температуры в ее центре на величину порядка $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данное значение объемной плотности мощности нагрева было получено как отношение $P_{\text{нагр}}$ при токе 350 мА к $V_{\text{акт.обл.}}$. Максимальная величина нагрева кристаллов светодиода составляет 332 К . Однако следует отметить, что такая температура достигается в светодиодах, находящихся в середине структуры, при том что расположенные на краях светодиоды испытывают меньший нагрев. Такое поведение

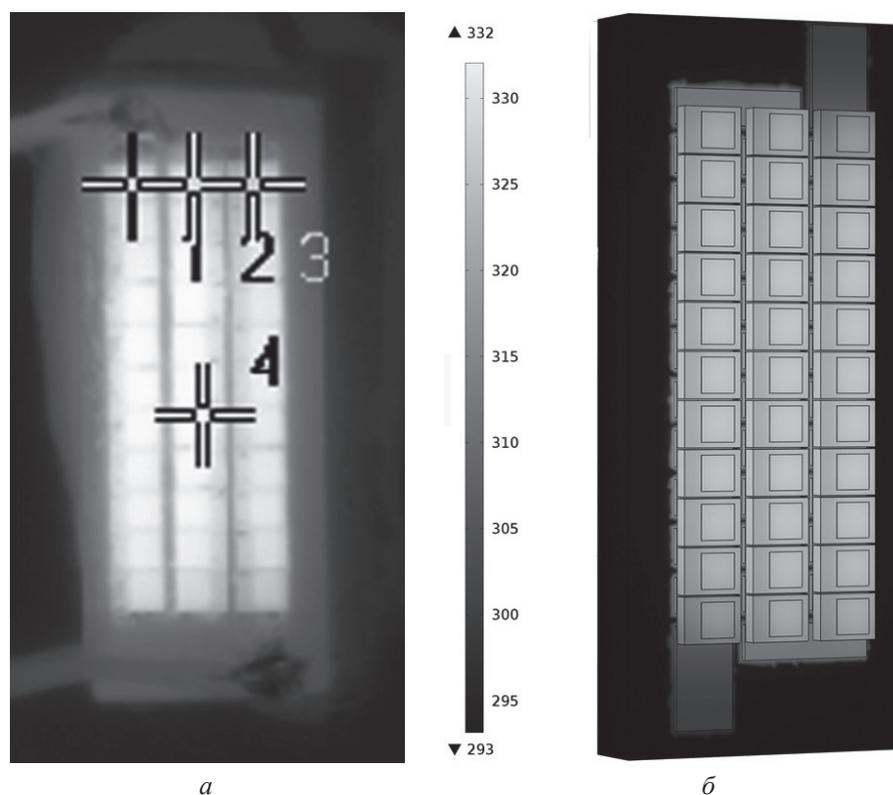


Рис. 2. Изображение матрицы светодиодов, полученное при помощи тепловизора при непрерывном токе 350 мА (*а*) и карта распределения температуры в матрице светодиодов, полученная в результате моделирования при токе инжекции 350 мА (*б*)

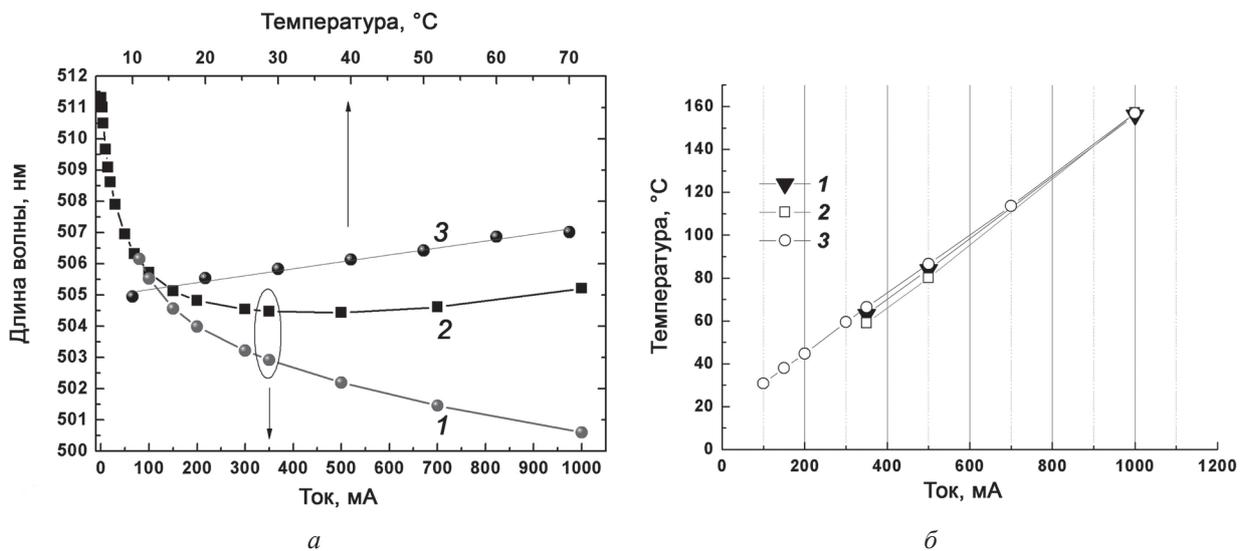


Рис. 3. Зависимости положений максимумов спектров ЭЛ светодиода LXZ1-PE01-0048 (а) от величины тока инжекции при импульсном (кривая 1) и непрерывном (кривая 2) токе, а также от температуры при импульсном токе 100 мА (кривая 3); максимальная температура светодиодов в матрице (б) в зависимости от тока инжекции, измеренная тепловизором (1), полученная в результате расчетов (2), а также температура активной области отдельного светодиода, полученная методом сравнения положений спектров ЭЛ (3)

обусловлено наличием на краях матрицы площадок медной металлизации, которые дополнительно отводят тепло от корпусов светодиодов. Данные площадки созданы для контакта светодиодов матрицы, соединенных последовательно, с источником тока. Как видно, результаты моделирования находятся в хорошем соответствии с данными, получаемыми при помощи тепловизора (см. рис. 2, а), отличие составляет $\sim 2^\circ\text{C}$. Также были проведены расчеты распределения температуры в модели матрицы для плотностей мощности, которые соответствуют токам инжекции 500 и 1000 мА. Полученные зависимости максимальных температур нагрева светодиодных кристаллов от плотностей мощности, которые соответствуют данным токам инжекции светодиодов, представлены на рис. 3, б.

На рис. 3, а приведены положения максимумов спектров электролюминесценции светодиода Rebel LXZ1-PE01-0048 в зависимости от тока инжекции при импульсном (кривая 1) и непрерывном (кривая 2) возбуждении. Измерения проводились при значениях токов от 1 до 1000 мА. Как видим, с ростом величины импульсного тока происходит только коротковолновое смещение спектра ЭЛ, что связано с заполнением состояний в квантовых ямах InGaN. Поведение кривой 2 обусловлено, помимо заполнения состояний, уменьшением ширины запрещенной зоны InGaN, которое вызвано нагревом с ростом величины непрерывного тока. Вычитая положения спектральных максимумов ЭЛ при импульсном токе из положений спектральных максимумов ЭЛ при таких же значениях непрерывного тока, получим зависимость изменения длины волны электролюминесценции от тока $\Delta\lambda(I)$, обусловленную только нагревом. Зависимость положения спектра ЭЛ светодиода LXZ1-PE01-0048 от температуры при импульсном токе 100 мА представлена на рис. 3, а (кривая 3). Из наклона данной зависимости получен коэффициент температурного смещения $\Delta T/\Delta\lambda = 29,71^\circ\text{C}/\text{нм}$. Умножая $\Delta\lambda(I)$ на $\Delta T/\Delta\lambda$, получаем зависимость температуры перегрева активной области светодиода от тока инжекции.

Максимальная температура перегрева активной области светодиода при токе инжекции 1 А составила $\Delta T_{\text{опт}} = 137^\circ\text{C}$. Зависимость температуры нагрева активной области светодиода от тока получалась прибавлением значения комнатной температуры (20°C). Данная зависимость представлена на рис. 3, б (кривая 3), из которого видно, что рассчитанные значения температуры светодиодов в матрице (кривая 3) практически совпадают с соответствующими величинами, полученными при непосредственных измерениях (кривая 1) и оптическим методом (кривая 2), что свидетельствует о хорошем соответствии результатов моделирования измеренным величинам температуры.

Небольшое несоответствие результатов моделирования относительно непосредственных измерений тепловизором может быть объяснено упрощениями используемой цифровой модели. В модели не учитываются зависимость от температуры коэффициентов теплопроводности, наличие контактных слоев между кристаллом и основанием светодиода и т. д. Несоответствие наклонов измеренных и полученных оптическим методом температурных зависимостей обусловлено, по-видимому, пренебрежением разогрева светодиодов при импульсном возбуждении.

Заключение. По температурному смещению спектров излучения показано, что максимальная температура перегрева активной области светодиода Rebel LXZ1-PE01-0048 при токе инжекции 1 А составляет 137 °С. При таком токе была получена максимальная плотность мощности излучения ~18 Вт/см². Создана цифровая 3D-модель, которая позволяет произвести расчет распределения температуры светодиодов матрицы, при различных значениях подводимой к светодиодам мощности. Показано, что значения температуры светодиодов, полученные при помощи моделирования, близки к соответствующим величинам, полученным из оптических измерений и при непосредственных измерениях тепловизором.

Список использованной литературы

1. <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2015/aug/the-incredible-shrinking-led>
2. Study of a QCW light-emitting-diode (LED)-pumped solid-state laser / K. Lee [et al.] // J. Korean Phys. Soc. – 2011. – Vol. 59, no. 5. – P. 3239–3245.
3. Луценко, Е. В. Характеристики инжекционных лазеров видимого диапазона спектра и их возможные применения / Е. В. Луценко // Полупроводниковые лазеры: физика и технология: тез. докл. 4-го Всерос. симп. с междунар. участием, 10–13 нояб. 2014 г., Россия, Санкт-Петербург. – СПб., 2014. – С. 40.
4. Шуберт, Ф. Светодиоды: пер. с англ. / Ф. Шуберт; под ред. А. Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – С. 127–142.
5. Матрица светодиодов с принудительным охлаждением / А. В. Данильчик [и др.] // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: 9-й Белорус.-Рос. семинар, 28–31 мая 2013 г., Минск, Беларусь: сб. ст. – Минск, 2013. – С. 178–181.
6. Active region overheating temperature of commercial and active liquid cooled LEDs / E. V. Lutsenko [et al.] // Annual proceedings the technical university of Varna 2010. International Scientific and Applied Conference Opto-Nano Electronics and Renewable Energy Sources 2010, 21–25 Sept. 2010, St. Constantine and Helena Resort, Varna, Bulgaria: Proceedings. – [S. l.], 2010. – P. 38–42.
7. Efficiency droop suppression in InGaN-based blue LEDs: Experiment and numerical modeling / D. A. Zakheim [et al.] // Phys. Status Solidi A. – 2012. – Vol. 209, no. 3. – P. 456–460.
8. Carrier recombination mechanisms and efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes / Q. Dai [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2010. – Vol. 97, iss. 13. – P. 133507-1–133507-3.

Поступила в редакцию 25.11.2015