

УДК 621.382.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАГРЕВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ И СВЕТООТДАЧУ МОЩНЫХ ОДНОКРИСТАЛЬНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ БЕЛОГО СВЕТА С ЛЮМИНОФОРМ

А. Е. Чижиков, д.т.н., профессор кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-5507-3309, e-mail: chigikov.a@yandex.ru

М. И. Галицын, магистрант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-5298-6508, e-mail: galicin_mikhail@mail.ru

Целью работы является определение основных причин снижения эффективности «синих» чипов на GaN/InGaN с кантовыми ямами и светоотдачи мощных однокристалльных ИБС на их основе - TDS-P003L4U10 (3 Вт, 220 Лм), Cree XM-L2 (10 Вт, 1040 Лм), выявление наилучших условий эксплуатации и разработки рекомендаций по повышению качества ИБС. Приведены результаты измерения относительных яркостей синего излучения чипов и суммарной яркости белого цвета ИБС, формируемой излучением чипа и фотолюминофора. Проведен расчет изменения напряжения диода, учитывающий зависимость концентрации свободных носителей, ширины запрещенной зоны и плотности состояний от температуры. Выявлено, что в TDS-P003L4U10 отклонение ВАХ и снижение эффективности обусловлено увеличивающимся с ростом тока (температуры) сопротивлением (0,6 – 0,86) Ом контактных проволок, соединяющих кристалл с силовым выводом, а в Cree XM-L2 – уменьшающимся с ростом тока сопротивлением (0,46-0,24) Ом слоев GaN (р, н) и подложки. Рассчитанное значение эффективности при рабочих токах для TDS-P003L4U10 (0,7 А) равно 0,82, для Cree XM-L2 при токе 0,7 А – 0,91, а при 3 А – 0,79. Уменьшение относительной светоотдачи также связано с изменением ВАХ.

Ключевые слова: источник белого света, синий светодиод, моночип, нитрид галлия, квантовые ямы, относительная эффективность, теоретическая ВАХ светодиода, светоотдача.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-209-219

Введение

Светодиодные источники белого света (ИБС) с люминофорным преобразованием синего или ультрафиолетового излучения светодиодов (чипов) находят широкое применение в автомобилях, для освещения улиц, иллюминации, рекламы и др. Основными составляющими структуры синего чипа являются слои InGaN/GaN разного стехиометрического состава на подложках из сапфира (Al_2O_3) фирмы Nichia или SiC (фирма Cree). Для получения нужного светового потока ИБС используются либо несколько однокристалльных (моночиповых) источников синего, либо ИБС на составном излучателе синего, состоящем из последовательно или параллельно соединенных моночипов.

Качество ИБС на основе моночипа зависит от технологии изготовления чипа, нанесения фотолюминофора, конструкции, материалов, режима работы. Качество самого моночипа зависит от дефектности кристалла, материала подложки, сопротивлений контактов и соединений, условий выращивания и формирования слоев перехода и квантовых ям.

Мощные одночиповые ИБС высокого качества обеспечивают большие световые потоки как за счет увеличения площади р-п перехода, так и за счет увеличения плотности инжекционного тока. При этом в рабочем режиме температура их перехода может достигать 200 °С при интенсивном теплоотводе от ИБС и нагрев, и охлаждение приводят к изменению как ВАХ синего светодиода, так и процессов преобразования излучения люминофором.

Известно много работ [1-5] по исследованию влияния тех или иных факторов на снижение светового потока источников, ход ВАХ синих чипов и их эффективность, на характери-

стики люминофоров и т.д. В современных мощных однокристалльных светодиодах на 10 Вт, обеспечивающих яркость более 10^8 кд/м² при световом потоке более 1000 лм и светоотдаче около 100 лм/Вт применены кристаллы большого размера, реализованы основные достижения полупроводниковой технологии, конструктивные и иные усовершенствования, применяются высококачественные фотолюминофоры (ФЛФ). Однако полностью устранить влияние ряда факторов и реализовать весь теоретический диапазон рабочих токов и напряжений пока не удается.

Исследование причин изменения светоотдачи (эффективности) с ростом температуры ИБС при увеличении тока в мощных ИБС позволит выявить факторы и разработать рекомендации по их устранению или снижению влияния.

Целью работы является исследование зависимости от подводимой мощности эффективности моночипов и светоотдачи мощных современных однокристалльных ИБС с целью определения основных причин их снижения, выявления наилучших условий эксплуатации источника и разработки рекомендаций по повышению качества ИБС.

Аналитическая часть

Светоотдача белого светодиода зависит от суммарной световой эффективности синего кристалла и эффективности преобразования синего излучения люминофором.

Исследованию и анализу влияния разных факторов на эффективность ИБС в экспериментальных образцах и источниках освещения посвящено много работ.

В статье [2] отмечается, что интенсивность свечения люминофора зависит не только от эффективности синего светодиода, но и от температуры самого фотолюминофора, которая, в свою очередь, зависит от температуры окружающей среды и активного выделения тепла в переходе в процессе работы. В результате исследования установлено, что температура люминофора может превышать температуру кристалла светодиода, что изменяет не только квантовый выход, но и цветовую температуру ИБС.

В работах [3, 4] полагалось, что отклонения ВАХ обусловлены появлением и влиянием таких механизмов, как высокое тепловыделение и его неравномерность, особенностями легирования полупроводниковой структуры, количеством и размерами квантовых ям, влиянием люминофора.

Так, в работе [6] указывается, что увеличение температуры р-п перехода при протекании тока приводит также к снижению внутренней и внешней квантовой эффективности. Отмечается, что рост температуры может приводить не только к смещению характеристик, но и к изменению цветовой температуры светодиода. В [4] рассматривается влияние температуры окружающей среды и кристалла на эффективность, а также влияние на нее расположения кристалла относительно кристаллодержателя, площади омических контактов, токопроводящих элементов и способа крепления самого кристалла.

Следует отметить, что в цитированных и других работах не рассматривается связь эффективности ИБС с особенностями хода ВАХ чипов, величиной отклонения их от теоретических и возможных путей снижения их влияния. Это обусловлено особенностями описания ВАХ сложных структур с квантовыми ямами (КЯ) на основе InGaN/GaN по сравнению с теоретическим уравнением Шокли для идеальных р-п переходов:

$$I = I_s \exp \frac{U - \varphi_k}{mkT}, \quad (1)$$

где U – внешнее напряжение, приложенное к переходу; I – ток перехода; m – коэффициент неидеальности полупроводниковой структуры; T – температура; φ_k – контактная разность потенциалов; I_s – ток насыщения; k – постоянная Больцмана.

Моделирование современных структур мощных кристаллов – излучателей синего света с КЯ [3] дало зависимость для ВАХ, аналогичную уравнению Шокли. Она отличается от идеальной тем, что коэффициент m зависит от параметра X (содержания индия в КЯ) и тока, а ток насыщения I_s , представлен в виде суммы электронного и дырочного токов КЯ. Эти токи

оказываются зависящими от глубины КЯ, T^2 , положения краев зон, квазиуровней Ферми. В готовых ИБС конструкция, содержание индия, количество и глубина квантовых ям – постоянные величины. Построенная в координатах $\lg I = f(U)$ ВАХ представляет собой прямую, отклонения которой от линейного хода определяются влиянием совокупности других влияющих факторов. Они зависят от температуры перехода и структуры, а сама температура зависит от тока, условий теплоотвода и конструкции ИБС. Изменение T приводит к изменению следующих параметров структуры:

- изменению ширины запрещённой зоны полупроводниковых слоёв;
- изменению сопротивления слоев (особенно нелегированных);
- изменению сопротивления проволочных контактов.

Для реализации возможности анализа величины отклонения реальной ВАХ от теоретического хода нами в работе [7] были проведены преобразования основного уравнения и получено простое выражение для идеализированной ВАХ структуры при пренебрежимо малом влиянии факторов и постоянных T , ϕ_k , m , I_s .

При малых токах, на начальном участке прямой ветви ВАХ после преобразований коэффициент неидеальности принимает следующий вид [7]:

$$m = \frac{e(U_2 - U_1)}{kT \ln \frac{I_2}{I_1}}, \quad (2)$$

где U_1 , U_2 , I_1 , I_2 – напряжения и токи на начальном участке прямой ветви ВАХ; e – заряд электрона; T – температура перехода.

Дальнейшие преобразования уравнения (1) дают выражение для идеализированной ВАХ:

$$\ln I = \frac{eU}{mkT} + \frac{1}{2} \left[\ln I_1 I_2 - \frac{e(U_1 + U_2)}{mkT} \right]. \quad (3)$$

После подстановки значения m получается такое же соотношение для ВАХ, содержащее только величины напряжений и токов:

$$\ln I = \frac{U \ln \frac{I_2}{I_1}}{(U_2 - U_1)} + \frac{1}{2} \left[\ln I_1 I_2 - \frac{(U_1 + U_2) \ln \frac{I_2}{I_1}}{(U_2 - U_1)} \right]. \quad (4)$$

Полученные зависимости описывают идеализированную ВАХ конкретной структуры с р-п переходом при температуре окружающей среды, учитывающую особенности состава, технологии и конструкции (неидеальность) перехода.

В реальной диодной структуре при прохождении тока увеличивается температура, что приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны, увеличению концентрации свободных носителей, изменению плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне. Совокупность этих изменений вызывает нарастающее отклонение ВАХ от линейного участка влево, в область меньших напряжений.

Наличие и влияние любых последовательных сопротивлений (слоев структуры и контактов) с увеличением тока должно приводить к отклонению ВАХ вправо.

Таким образом, для выяснения причин снижения качества ИБС необходимо сравнить влияние перечисленных выше факторов и величины тока (температуры) на светоотдачу (эффективность) синего чипа и фотолуминофора в современных мощных белых светодиодах.

Экспериментальная часть

Методика эксперимента. В качестве исследуемых образцов были выбраны: сверхяркий TDS-P003L4U10 мощностью 3 Вт (220 Лм) и однокристалльный 10 Вт (1040 Лм) светодиод второго поколения Cree XM-L2.

Основные параметры кристалла – моночипа светодиода TDS-P003L4U10: размер $1,143 \times 1,143$ мм, максимальный прямой ток – 700 мА, напряжение: 3,8 – 4,2 В. Мощность: 3 Вт. Подложка из кремния, материал чипа – (GaN) InGaN, страна-изготовитель – Китай.

Кристалл – моночип светодиода Cree XM-L2: максимальный прямой ток 3А, напряжение 2,85 – 3,2 В, мощность 10 Вт. Кристалл выращен на подложке из карбида кремния. Материал чипа – (GaN) InGaN, страна изготовитель кристалла – Китай. В связи с высокой температурой нагрева при максимальном токе светодиод необходимо устанавливать на теплоотвод. Размер чипа в паспортных данных не приводится, но из 3D модели, представленной на сайте производителя и измерений с помощью микроскопа, – $3,2 \times 3,2$ мм.

Для оценки светоотдачи необходимо измерение яркости и расчет светового потока возбуждающего синего излучения моночипа и суммарного излучения всего источника

Суммарное излучение светодиода содержит спектр с двумя максимумами: на длине волны 450 нм, соответствующем синему излучению, и 555 нм, соответствующем излучению люминофора.

Выделение синего спектра светодиода обеспечивалось использованием светофильтра ФС-1 и измерителя эквивалентного яркости синего излучения тока вакуумного фотоэлемента Ф-10. Спектральная чувствительность фотокатода марки С-11 (0,3-0,85 мкм) и полоса пропускания ФС-1 позволяли выделять синюю область спектра 450 нм. Напряжение на анод фотоэлемента подавалось от универсального источника питания УИП-2, с возможностью регулировки напряжения.

Во избежание насыщения тока фотоэлемента напряжение питания составляло: для измерения TDS-P003L4U10 чипа 150 В, для чипа Cree XM-L2 100В. Относительная яркость полагалась пропорциональной току фотоэлемента I_{ϕ} , измеряемому мультиметром М838.

Суммарная яркость люминофора измерялась с помощью люксметра – яркомера ТКА-ПКМ2. Спектральная характеристика данного прибора соответствует кривой видности человеческого глаза. При этом чувствительность прибора в синей области спектра составляет менее 3 %. Максимальное фиксируемое значение яркости ТКА-ПКМ2 $2 \cdot 10^5$ кд/м². Погрешность измерения составляет 10 %.

Принципиальная схема, используемая при исследованиях яркости и для снятия ВАХ, представлена на рисунке 1.

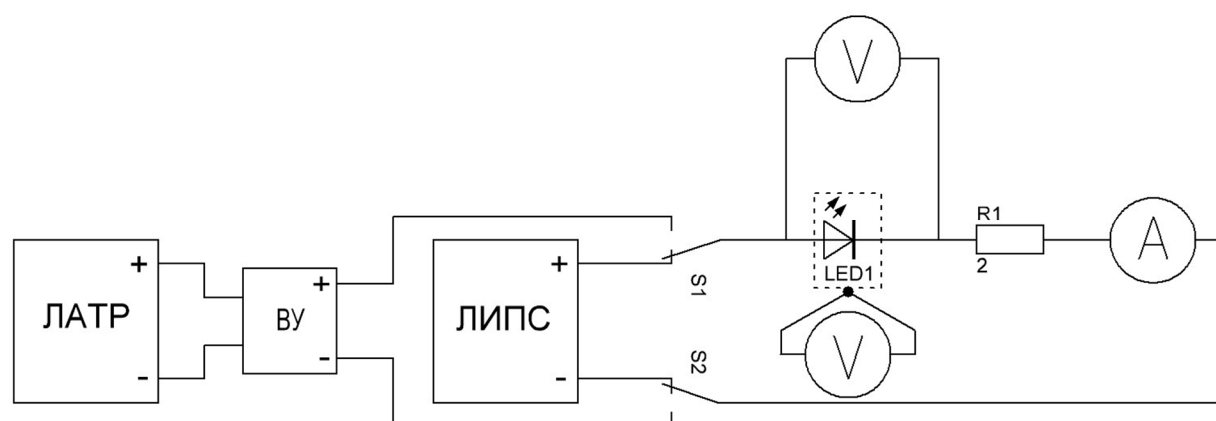


Рисунок 1 – Схема устройства для проведения исследований

Figure 1 – Circuit of a device for research

ВАХ снималась на постоянном токе при питании от лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), к выводам которого было подключено выпрямляющее устройство (ВУ), позволяющее плавно регулировать ток до 1 А, и напряжение до 5 В. Ток в цепи и напряжение на выводах диода измерялись цифровым мультиметром М838. Погрешность измерений не превышала 0,005 В и 0,01 величины измеряемого тока. Погрешность измерений для напряжения определяется выражением $\pm(0,8 \% + 5)$. Разрешение составляет 10 мВ для предела измерений

в 20 В. Для токов погрешность изменяется от $\pm(0,8\%+10)$ до $\pm(2\%+5)$ в диапазоне от 2 мА до 20 А. Для получения численного значения величины отклонения необходимо умножить полученное значение на величину отклонения в % (первое слагаемое в скобках) и добавить к нему величину, полученную перемножением единиц младшего разряда (второе слагаемое в скобках) на разрешение.

При исследовании светодиода Cree XM-L2 при токах до 3 А использовался лабораторный источник питания (ЛИПС) со стабилизацией выходных параметров и возможностью плавного изменения тока в исследуемой цепи. Экспериментальные измерения ВАХ проводились до величин предельно допустимых токов, заявленных изготовителем.

Для измерения температуры использовались термопара типа К4 и цифровой мультиметр M890G. В случае исследования TDS-P003L4U10 термопара прижималась непосредственно к радиатору на задней части светодиода. В этом источнике благодаря массивному компактному устройству теплоотвода наружная температура последнего мало отличается от T структуры. Это позволяет измерять непосредственно T структуры, близкую к T перехода. При исследовании светодиода Cree XM-L2 термопара располагалась на радиаторе в непосредственной близости к корпусу светодиода.

При исследовании влияния внешнего нагрева использовалась высокотемпературная лабораторная печь. Контроль температуры в печи проводился с помощью ртутного термометра.

Результаты измерений

Полученная по измерениям зависимость относительной яркости $B_{\text{отн}}$ (пропорциональной току фотозлемента I_{ϕ}) «синих» чипов светодиодов TDS-P003L4U10 и Cree XM-L2 от прямого тока через светодиод представлена на рисунке 2.

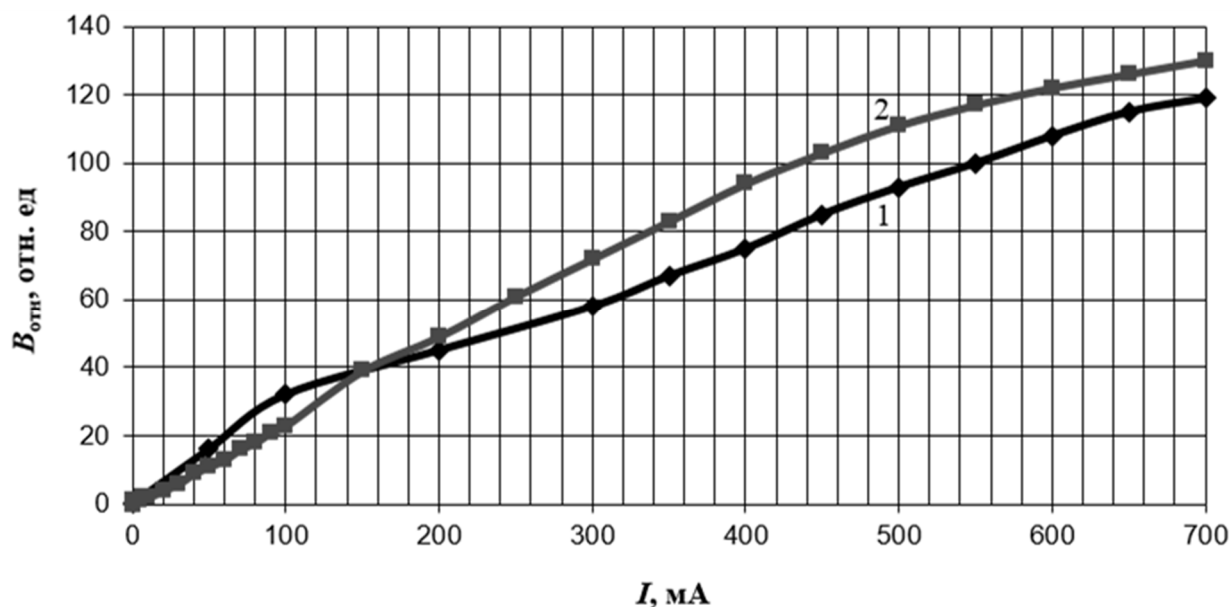


Рисунок 2 – Зависимость относительной яркости $B_{\text{отн}}$ синих чипов светодиодов от тока:

1 – TDS-P003L4U10, 2 – Cree XM-L2

Figure 2 – Relative brightness of $B_{\text{отн}}$ of blue LED chips on current:

1 – TDS-P003L4U10, 2 – Cree XM-L2

На рисунке 3 приведена зависимость яркости белого света светодиодов от тока чипов. При измерении яркости датчик ТКА-ПКМ2 располагался вертикально над светодиодами на расстоянии 2,5 см. Для сравнения измерения проводились в диапазоне токов до 0,7 А. Максимальная яркость $2 \cdot 10^5$ кд/м² была близка к верхнему пределу измерений датчика, но на несколько порядков меньше максимальной яркости Cree XM-L2.

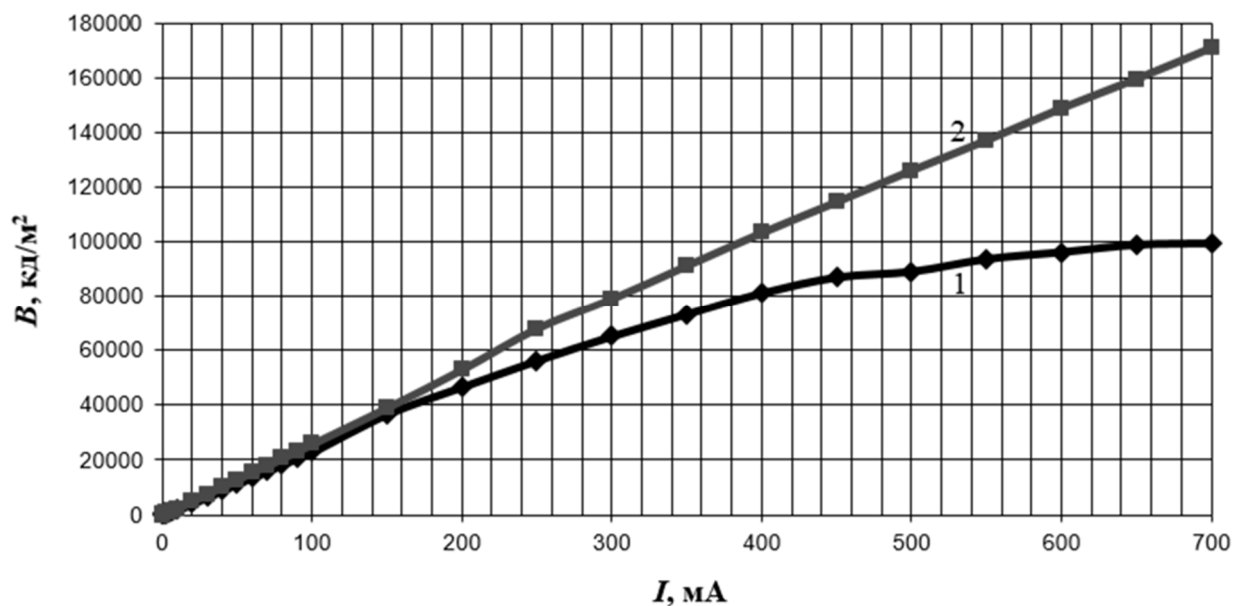


Рисунок 3 – Зависимости суммарной яркости ИБС от тока: 1 – TDS-P003L4U10, 2 – Cree XM-L2
 Figure 3 – Dependences of the total brightness of SWL on current: 1 – TDS-P003L4U10, 2 – Cree XM-L2

Относительная энергетическая эффективность E рассчитывалась как отношение мощности, расходуемой непосредственно в активной области $P_{ид}$ синего чипа по идеализированной ВАХ, к полной мощности $P_{эксп}$ по экспериментальной ВАХ, подводимой к светодиоду. Результаты расчета приведены на рисунке 4.

Относительная светоотдача $E_{отн}$ рассчитывалась как отношение светового потока Φ (лм), рассчитанного по измеренной с помощью ТКА-ПКМ2 яркости ИБС, к полной мощности $P_{эксп}$, подводимой к светодиоду и определяемой по экспериментальной ВАХ. Результаты расчетов относительных эффективности и светоотдачи от подводимой мощности P приведены на рисунке 4.

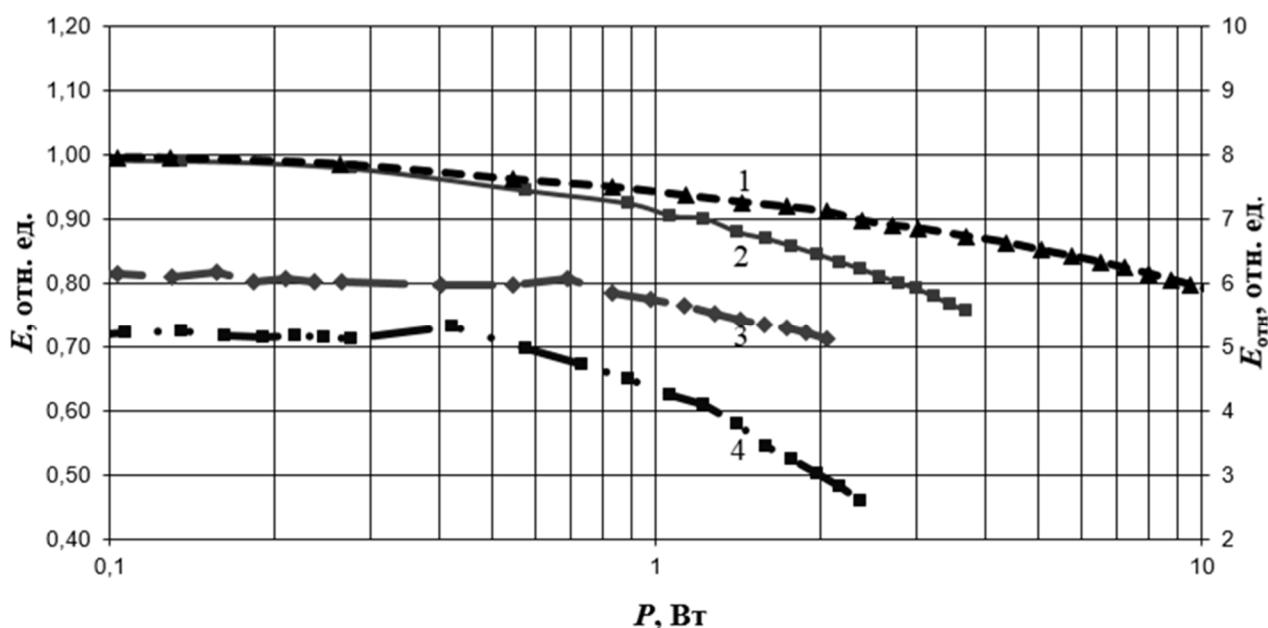


Рисунок 4 – Зависимость относительных эффективности (1, 2) и светоотдачи (3, 4) ИБС: TDS-P003L4U10 (2, 4) и Cree XM-L2 (1, 3) от подводимой мощности
 Figure 4 – The dependence of the relative efficiency (1, 2) and relative light output (3, 4) SWL: TDS-P003L4U10 (2, 4) and Cree XM-L2 (1, 3) on the input power

Полученные зависимости показывают спад относительных светоотдачи и эффективности с некоторого граничного тока. Для выяснения причины такого спада были сняты ВАХ чипов и проведено сравнение их хода с идеализированной ВАХ. Графическая интерпретация полученных данных приведена на рисунках 5, 6.

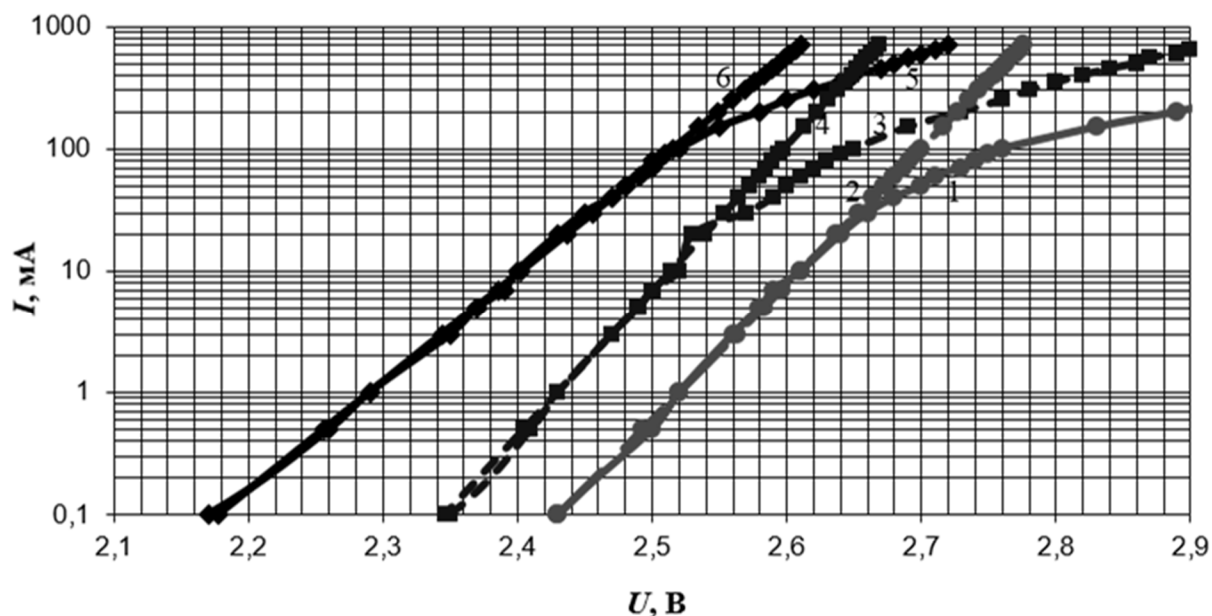


Рисунок 5 – Экспериментальные (1, 3, 5) и теоретические (2, 4, 6) ВАХ при двух температурах окружающей среды для TDS-P003L4U10 (1, 2) и Cree XM-L2(3-6): 1-4 – 23 °C; 5, 6–100 °C

Figure 5 – Experimental (1, 3, 5) and theoretical (2, 4, 6) CVC at two ambient temperatures for TDS-P003L4U10 (1, 2) and Cree XM-L2(3-6): 1-4 – 23 °C; 5, 6–100 °C

Исходя из представленных на рисунке 5 результатов, можно определить величину отклонения ΔU экспериментально получаемого напряжения на светодиоде от его идеального значения при одном и том же токе, что в свою очередь позволяет определить величину изменения сопротивления ΔR . Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица – Расчетные данные для чипов TDS-P003L4U10 and Cree XM-L2

Table – Calculated data for TDS-P003L4U10 and Cree XM-L2 chips

TDS-P003L4U10			Cree XM-L2		
I, mA	$\Delta U, \text{V}$	$\Delta R, \text{Om}$	I, mA	$\Delta U, \text{V}$	$\Delta R, \text{Om}$
50	0,03	0,6	50	0,02	0,42
100	0,06	0,6	100	0,05	0,46
150	0,11	0,73	500	0,22	0,43
200	0,16	0,8	1000	0,35	0,35
250	0,19	0,76	1200	0,4	0,33
300	0,23	0,77	1400	0,43	0,31
350	0,29	0,83	1600	0,47	0,3
400	0,31	0,78	1800	0,51	0,28
450	0,38	0,84	2000	0,55	0,27
500	0,42	0,84	2200	0,58	0,27
550	0,46	0,84	2400	0,62	0,26
600	0,51	0,85	2600	0,66	0,25
650	0,56	0,86	2800	0,69	0,25
700	0,6	0,86	3000	0,73	0,24

Для получения уравнения идеализированной ВАХ применялась методика, разработанная нами и приведенная ранее в работе [7]. Для чипа TDS-P003L4U10 на начальном участке экспериментальной зависимости (рисунок 5) взяты токи 1 и 10 мА и соответствующие напряжения $U_1=2,52$ В, $U_2=2,61$ В при 296 К. Полученные расчетные уравнения идеализированной ВАХ TDS-P003L4U10:

$$\ln I = 25,6U - 71,4. \quad U = (\ln I + 71,4)/25,6 \text{ В.}$$

Рассчитанные с использованием уравнений (1) и экспериментальных ВАХ значения $m=1,53$, $\phi_k=2,914$ В, $I_s=22$ А, $U=2,78$ В при $I=0,7$ А хорошо коррелируются с приводимыми в литературе данными для структур GaN/InGaN.

Для построения идеализированной ВАХ чипа Cree XM-L2 использовались величины токов 1 и 3 мА, соответствующие токам напряжения $U_1=2,43$ В, $U_2=2,47$ В при 296 К. Полученное уравнение прямой идеализированной ВАХ Cree XM-L2:

$$\ln I = 27,5U - 73,6. \quad U = (\ln I + 73,6)/27,5.$$

Рассчитанные значения $m=1,43$, $\phi_k=2,92$ В, $I_s=671$ А, $U=2,67$ В при $I=3$ А также хорошо коррелируются с приводимыми в литературе данными.

Для построения идеализированной ВАХ чипа Cree XM-L2 при температуре окружающей среды в 100°C использовались величины токов 0,1 и 90 мА, соответствующие токам напряжения $U_1=2,17$ В, $U_2=2,51$ В при 373 К. Полученное уравнение прямой идеализированной ВАХ Cree XM-L2:

$$\ln I = 20,5U - 53,7. \quad U = (\ln I + 53,7)/20,5.$$

Рассчитанные значения $m=1,52$, $\phi_k=2,92$ В, $I_s=424$ А, $U=2,61$ В при $I=3$ А тоже коррелируются с приводимыми в литературе данными.

Увеличение тока и соответственно возрастание температуры перехода должны приводить к нарастающему отклонению ВАХ от линейного участка влево, в область меньших напряжений из-за уменьшения ширины запрещенной зоны, увеличения концентрации свободных носителей и температурной зависимостью плотности состояний.

Наличие и влияние любых последовательных сопротивлений (слоев структуры и контактов) с увеличением тока должно приводить к отклонению ВАХ вправо.

Анализ результатов и выводы

При проведении анализа необходимо сравнить параметры источников. Оба прибора изготовлены на базе InGaN, с квантовыми ямами, однако площадь кристалла Cree XM-L2 почти в 10 раз больше, чем у TDS-P003L4U10. Максимальные рабочие токи 0,7 А и 3 А соответственно при напряжениях 2,85 – 3,2 В и 3,8 – 4,2 В.

Наши расчеты по начальному участку экспериментальной ВАХ обоих приборов дают примерно одинаковое значение $\phi_k=2,914$ и 2,92 В, реальные $m=1,53$ и 1,43, существенно разные токи насыщения $I_s=22$ А и 671 А. Последнее ожидаемое различие вполне объясняется разной площадью кристаллов.

Сравнение зависимостей от тока относительной яркости (интенсивности) излучения синих чипов и интенсивности суммарного белого показывает наличие на зависимостях 2-х участков. На начальном участке для синих чипов имеет место более сильная зависимость, переходящая в менее сильную линейную зависимость. Переход участков происходит при токах, для которых на ВАХ начинается заметное отклонение экспериментальной ВАХ от идеализированной.

Рассчитанная по результатам экспериментальных измерений энергетическая эффективность (рисунок 4, кривые 1, 2) при увеличении мощности для TDS-P003L4U10 демонстрирует более ранний и быстрый спад, чем для Cree XM-L2. Характер спада, аналогичный спаду энергетической эффективности, имеет место и для зависимости относительной светоотдачи от подводимой мощности (рисунок 4, кривые 3, 4). Однако в отличие от энергетической эффективности зависимости носят более сложный характер. На кривых имеются возрастающие участки, участки с практически постоянной светоотдачей и участки с линейным спадом све-

тоотдачи. Следует отметить, что, как и для энергетической эффективности, светоотдача при увеличении мощности для TDS-P003L4U10 демонстрирует более ранний и быстрый спад, чем для Cree XM-L2.

Сравнение хода зависимостей для эффективности и светоотдачи с ходом экспериментальных и расчетных ВАХ (рисунки 4, 5, 6) показывает, что начало снижения эффективности и светоотдачи соответствует токам (мощностям), при которых начинается отклонение экспериментальных ВАХ от рассчитанного для начальной (комнатной) температуры хода идеализированной ВАХ.

В нашей работе [7] при исследовании TDS-P003L4U10 не учитывалось влияние нарастающей температуры на ВАХ и величину отклонения идеализированной и экспериментальной зависимостей.

Повышение температуры приводит к сдвигу влево экспериментальных ВАХ. Для оценки влияния температуры использовалась приведенная в [8] зависимость прямого напряжения диода от температуры и, следовательно, от тока:

$$dU/dT = \frac{k}{e} \ln \frac{N_d N_a}{N_c N_v} - \frac{\alpha T (T + 2\beta)}{(T + \beta)^2} - \frac{3k}{e}. \quad (5)$$

В этом соотношении 1-й член обусловлен изменением концентрации свободных носителей, 2-й – изменением ширины запрещенной зоны по Варшни и 3-й – зависимостью плотности состояний от температуры.

Значения параметров Варшни для нитрида галлия следующие: $E_{g0} = 3,47$ эВ, $\alpha = 7,70 \cdot 10^{-4}$ эВ/К, $\beta = 600$ К.

Для GaN при 300 К величина $N_c N_v = 2,3 \cdot 10^{18} \cdot 1,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-6}$.

При $T = 473$ К для $N_d = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_a = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ рассчитанная величина изменения прямого напряжения диода составляет 1,01 мВ/К. Рассчитанная при 296 К величина составляет 0,8 мВ/К.

Для средней величины 1 мВ/К при изменении T от 296 до 455 К сдвиг $\Delta U_{\text{Ег}}$ соответствующей точки ВАХ вследствие изменения ширины запрещенной зоны под действием температуры составит 0,159 В, т.е. реальное отклонение ВАХ будет больше, чем определенное по отклонению от идеализированной ВАХ для комнатной T .

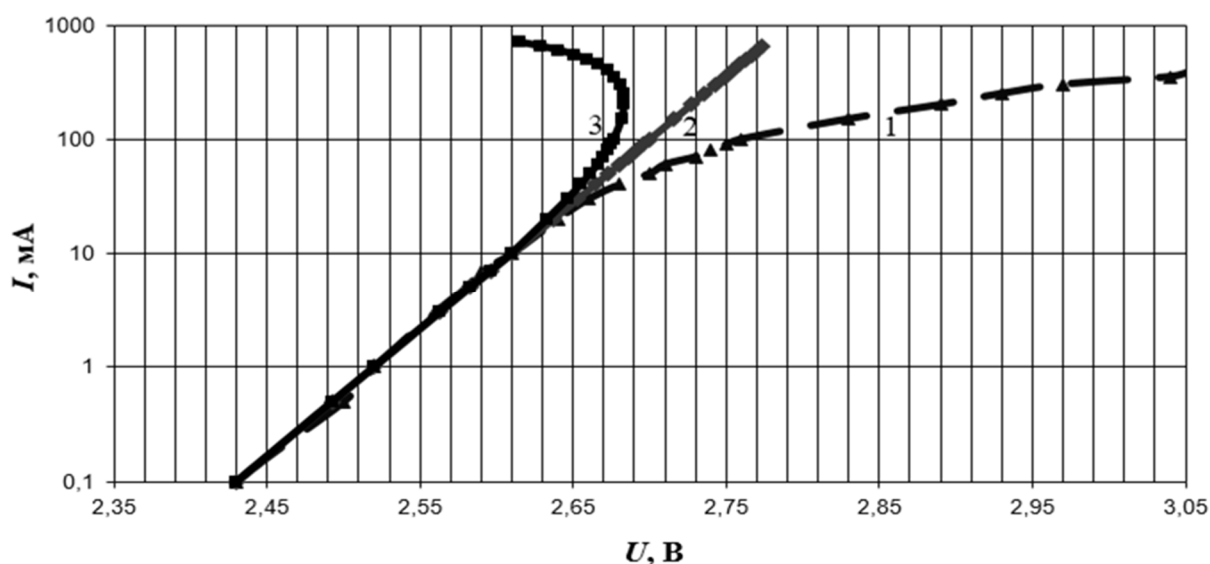


Рисунок 6 – Экспериментальная (1), теоретическая (2) без учета T и R и идеализированная (3) ВАХ с учетом изменения T для TDS-P003L4U10

Figure 6 – Experimental (1), theoretical (2) excluding T and R and idealized (3) CVC taking into account the change in T for TDS-P003L4U10

Вполне обоснованно можно предположить, что основной причиной такого отклонения является последовательное сопротивление структуры и контактов.

Как уже говорилось ранее, сопротивление, полученное по суммарному отклонению экспериментальной характеристики от идеальной при соответствующем токе (температуре) для TDS-P003L4U10 увеличивается от 0,6 до 0,86 Ом. Поскольку для чипа Cree XM-L2 ввиду его конструктивных особенностей невозможно измерить T перехода, полагалось, что факторы, искажающие его экспериментальную ВАХ, аналогичны TDS-P003L4U10. Отклонения рассчитывались по отношению к $T=296$ К для начального участка идеализированной ВАХ.

Так как измерение температуры структуры Cree XM-L2 для разных токов невозможно ввиду его конструктивных особенностей, были сняты ВАХ при 2-х разных температурах внешней среды. Полученные зависимости (рисунок 5) подтверждают приведенные ранее основные положения: увеличение T приводит к сдвигу экспериментальной кривой влево и изменению угла наклона кривой. Сдвиг кривой влево происходит из-за влияния факторов, определяемых уравнением (5). Изменение угла наклона кривой можно объяснить тем, что с увеличением тока уменьшается влияние внешнего нагрева структуры.

Сравнение полученных зависимостей сопротивления от тока с учетом влияния температуры (таблица) подтверждает полученный нами ранее [7] вывод о том, что в TDS-P003L4U10 основной причиной отклонения является сопротивление контактов (0,6-0,86) Ом, возрастающее с ростом температуры (тока). В отличие от TDS-P003L4U10 для Cree XM-L2 отклонение определяется сопротивлением слоев структуры (0,46 – 0,24) Ом, уменьшающееся с увеличением тока. Действительно, по данным [9] в приборах 1-го поколения данной серии изначально увеличено количество контактных проволок.

Полученные результаты объясняют различие в величине и скорости снижения эффективности с ростом тока (мощности) исследованных ИБС. Потери энергии в Cree XM-L2 меньше и определяются сопротивлением слоев при пренебрежимо малом влиянии сопротивления контактов, а влияние сопротивления слоев – при малом влиянии сопротивления контактов. Влияние сопротивления слоев структуры меньше из-за большей (почти на порядок) площади моночипа и меньшей плотности тока.

Результаты позволяют сделать вывод не только о большей эффективности моночипов большей площади, но и о большем диапазоне возможностей увеличения светового потока за счет улучшения теплоотвода.

Данный вывод может быть использован для оценки качества готовых ИБС и монохроматических светодиодов, а также при отработке технологии их производства.

Библиографический список

1. **Константинов В. И., Вставская Е. В.** и др. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей // Вестник ЮУрГУ. 2010. № 2. С. 46-51.
2. **Короткова К. В., Романова М. А., Смирнов С. В.** Температурная и временная стабильность колориметрических параметров полупроводниковых источников света // Доклады ТУСУРа. 2017. Том 20. № 2. С. 38-41.
3. **Рабинович О., Сушков В.** Моделирование характеристик многокомпонентных гетероструктур для производства светоизлучающих диодов // Полупроводниковая светотехника. 2010. №2. С. 25-34.
4. **Некифоров С., Архипов А.** Особенности определения квантового выхода светодиодов на основе AlGaInN и AlGaInP при различной плотности тока через излучающий кристалл // Компоненты и технологии. 2008. № 1. С. 82-85.
5. **Дохтуров В., Смирнов С.** Влияние локализации тепловыделения на тепловое сопротивление мощных полупроводниковых источников света // Полупроводниковая светотехника. 2013. № 3. С.18-19.
6. **Лукаш В. С., Романова М. А., Смирнов С. В.** Тепловой режим приборных светодиодных ламп ЛПМ 26 // Доклады ТУСУРа. 2016. Т. 19. № 1. С. 111-113.
7. **Чижигов А. Е., Галицын М. И.** Исследование эффективности диодов синего излучения в люминофорных источниках белого света // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 68. С.134-140.

8. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. М.: Физматлит, 2008. 496 с.

9. Некифоров С. Исследования параметров светодиодов Cree XLamp XP-E/XPG/XM-L // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 2. С. 1-10.

UDC 621.382.2

INVESTIGATION OF HEATING EFFECT ON EFFICIENCY AND LIGHT OUTPUT OF POWERFUL SINGLE CRYSTAL LED SOURCES OF WHITE LIGHT WITH PHOTOLUMINOPHOR

A. E. Chizhikov, Dr. Sc. (Tech.), full professor, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-5507-3309, e-mail: chigikov.a@yandex.ru;

M.I. Galitsyn, master student, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-5298-6508, e-mail: galicin_mikhail@mail.ru.

The aim of this work is to identify the main reasons for the decrease in efficiency of «blue» GaN/InGaN chips with quantum wells and light output of powerful single crystal SWL based on them - TDS-P003L4U10 (3 W, 220 Lm), Cree XM-L2 (10 W, 1040 Lm), identification of best operating conditions and development of recommendations to improve SWL quality. The results of measuring relative brightness of chips blue radiation and total brightness of SWL white color formed by the radiation of chip and photoluminophore are presented. Calculation of change in diode voltage was carried out taking into account the dependence of free carriers concentration, band gap, and the density of states on temperature. It was revealed that in TDS-P003L4U10 the CVC deviation and decrease in efficiency are caused by increasing (0,6 – 0,86) Ohm resistance of contact wires connecting the crystal with high-current output with increasing current (temperature) and in Cree XM-L2 – decreasing with increasing series resistance (0,46-0,24) Ohm of GaN layers (p, n) and substrate. The calculated efficiency value at operating currents for TDS-P003L4U10 (0,7 A) is 0,82, for Cree XM-L2 at the current of 0,7 A – 0,91, and at 3 A – 0,79. The decrease in relative light output is also associated with CVC deviation.

Key words: white light source, blue LED, single crystal, GaN, quantum wells, relative efficiency, theoretical CVC of LED, light output.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-209-219

References

1. Konstantinov V. I., Vstavskaya E. V. i dr. Vybora optimal'nogo rezhima raboty svetodiodnykh izluchatelej. *Vestnik YUUrGU*. 2010, no. 2, pp. 46-51. (in Russian).
2. Korotkova K. V., Romanova M. A., Smirnov S. V. Temperaturnaya i vremennaya stabil'nost' kolorimetricheskikh parametrov poluprovodnikovyykh istochnikov sveta. *Doklady TUSURa*. 2017, vol. 20, no. 2, pp. 38-41. (in Russian).
3. Rabinovich O., Sushkov V. Modelirovaniye harakteristik mnogokomponentnykh geterostruktur dlya proizvodstva svetozluchayushchikh diodov. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*. 2010, no. 2, pp. 25-34. (in Russian).
4. Nekiforov S., Arhipov A. Osobennosti opredeleniya kvantovogo vyhoda svetodiodov na osnove Al-GaN i AlGaInP pri razlichnoy plotnosti toka cherez izluchayushchij kristall. *Komponenty i tekhnologii*. 2008, no. 1, pp. 82-85. (in Russian).
5. Dohturov V., Smirnov S. Vliyaniye lokalizatsii teplovydeleniya na teplovoe soprotivleniye moshchnykh poluprovodnikovyykh istochnikov sveta. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*. 2013, no. 3, pp. 18-19. (in Russian).
6. Lukash V. S., Romanova M. A., Smirnov S. V. Teplovoj rezhim pribornykh svetodiodnykh lamp LPM 26. *Doklady TUSURa*. 2016, vol. 19, no. 1, pp. 111-113. (in Russian).
7. Chizhikov A. E., Galitsyn M. I. Issledovaniye effektivnosti diodov sinego izlucheniya v lyuminofoznykh istochnikakh belogo sveta. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2019, no. 68, pp. 134-140. (in Russian).
8. Shubert F. E. *Svetodiody* (Light-emitting diodes). Moscow: Fizmatlit. 2008, 496 p. (in Russian).
9. Nekiforov S. Issledovaniya parametrov svetodiodov Cree XLamp XP-E/XPG/XM-L). *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*. 2011, no. 2, pp. 1-10. (in Russian).