УДК 621.32:621.314.692

# В.С. Солдаткин, Ю.В. Ряполова, К.Н. Афонин, А.Ю. Олисовец, В.И. Туев

# Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов

Изложены результаты по прогнозированию срока службы лампы с одним, двумя и четырьмя светодиодными излучающими элементами (СИЭ), смонтированными в стеклянную колбу лампы накаливания с цоколем Е27, в зависимости от температуры окружающей среды, проведён анализ основных светотехнических и электрических характеристик, приведены результаты теплового расчёта.

**Ключевые слова:** светодиодный излучающий элемент, нитрид галлия, отвод тепла, срок службы, светодиодная лампа.

Современные системы освещения разрабатываются с применением высокоэффективных и надёжных источников света, которыми являются светодиодные лампы, превосходящие по значениям световой отдачи и срока службы своих предшественников: ламп накаливания, люминесцентных, натриевых, галогенных ламп. При этом светодиодные лампы уступают большинству перечисленных ламп в цене и, как правило, имеют непривычный дизайн. Кроме того, существенным недостатком известных конструкций светодиодных ламп, отличающим их от традиционных, является выраженный «прожекторный эффект», т.е. несферическое светораспределение. Распределение же силы света ламп накаливания близко к сфере. Учитывая то, что конструкция осветительных устройств для домашнего использования (люстры, светильники, бра и т.д.) разработана именно под параметры светового распределения ламп накаливания, применение в них большинства светодиодных ламп оказывается неэффективным: распределение света по помещению не соответствует ожиданиям потребителей. Именно по этой причине необходима разработка светодиодной лампы со сферическим светораспределением. С целью удешевления конечной продукции следует в конструкции но-

вой лампы применить стеклянную колбу и цоколь от лампы накаливания, изготовление которых автоматизировано и производственные издержки сведены к минимуму. Простое и логичное конструктивное решение светодиодной лампы в корпусе лампы накаливания — заменить нить накала светодиодным излучающим элементом.

**Постановка задачи.** Лампа состоит из колбы (рис. 1), в которой на опорной конструкции смонтированы один, два или четыре СИЭ. Опорная конструкция герметично вварена в колбу. Колба снабжена стандартным цоколем Е27, в цоколе расположено устройство питания. СИЭ состоит из ряда последовательно соединённых нитридгаллиевых кристаллов, покрытых люминофорной композицией.



Рис. 1. Фотография светодиодного излучающего элемента, смонтированного в колбу лампы

Известно, что срок службы светодиодов на основе кристаллов из нитрида галлия и его твёрдых соединений может достигать ста тысяч часов [1]. Методики определения срока службы светодиодов изложены в стандартах: ОСТ11-336.938–83 «Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность» — отечественном, LM-80, TM-21 — зарубежных (США). Стандарты относятся к однокристальным светодиодам и сроку службы самого кристалла. Ключевым фактором, определяющим срок службы светодиода в этих стандартах, является температура p-n-перехода. В отличие от выпускаемых в настоящее время единичных светодиодов и светодиодных матриц, кристаллы СИЭ герметично закрыты люминофорной композицией и помещены в

колбу, СИЭ не имеет прямого соприкосновения с окружающим воздухом, что снижает естественную конвекцию, а следовательно, наработанные исследовательские результаты испытаний различными коллективами авторов [1–9] нельзя распространять на предлагаемую конструкцию. Таким образом, целью работы является прогнозирование срока службы СИЭ, а для достижения заданной цели следует решить следующие задачи:

- проанализировать зависимость светового потока, световой отдачи и прямого напряжения СИЭ от тока для известных конструкций СИЭ для определения критических режимов при постоянной температуре окружающей среды;
- определить температурный коэффициент напряжения (ТКН) СИЭ, сравнить с однокристальной конструкцией и учесть эти данные при проведении теплового расчёта и прогнозирования срока службы СИЭ;
- провести тепловые расчёты конструкции СИЭ с учётом отсутствия конвекции и отводом тепла только через места контактной сварки к металлическим частям опорной конструкции внутри колбы лампы; по результатам тепловых расчётов спрогнозировать срок службы СИЭ в зависимости от температуры окружающей среды.

На рис. 1 приведена фотография светодиодного излучающего элемента, смонтированного в колбу лампы для проведения измерений основных характеристик в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Анализ основных световых и электрических характеристик СИЭ внутри колбы лампы. Для проведения исследования выбраны по пять макетных образцов светодиодной лампы с двумя типами СИЭ, под номерами: образцы типа №1 (нейтральный белый цвет, металлическое основание); образцы типа №2 (тёплый белый цвет, металлокерамическое основание). СИЭ состоит из ряда последовательно соединённых кристаллов малой мощности. График зависимости светового потока имеет типовой для светодиодов вид (рис. 2, *a*), где на начальном этапе зависимость имеет линейный характер и световой поток возрастает с ростом значения прямого тока. В центральной части зависимость меняет характер, и световой поток начинает снижаться с ростом электрической нагрузки, что связано с нагревом активной области кристаллов и объясняется увеличением доли безызлучательной рекомбинации носителей в материале кристалла. При дальнейшем увеличении электрической нагрузки происходит тепловое разрушение кристаллов, а также возникает эффект стягивания тока под омическими контактами кристалла, что приводит к локальному перегреву приконтактной области кристалла [8].

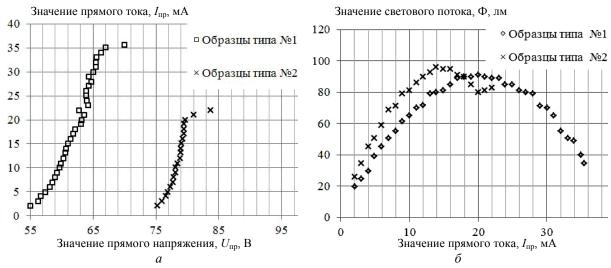


Рис. 2. Графики зависимостей светового потока от тока (а), вольт-амперные характеристики (б)

Из рис. 2, a видно, что в зависимости от материала основания наблюдается существенная разница ВАХ. Видно, что эффект теплового разрушения начинает проявляться у образца №2 при прямом токе 14 мА, который можно считать для такой конструкции критическим, а образцы СИЭ с металлическим основанием №1 – при прямом токе до 20 мА. Из рис. 2,  $\delta$  видно, что для образцов типа №1 тепловое разрушение произошло при значении прямого тока 35 мА, для образцов типа №2 – при прямом токе 20 мА, что связано с возможностями конструкции СИЭ отводить тепло от активной

области кристаллов. Разница в напряжениях СИЭ 55 и 75 В обусловлена тем, что образцы СИЭ №1 и №2 разных производителей и имеют разные кристаллы. Кристаллы имеют разные рабочие напряжения, и при последовательном соединении разница между образцами №1 и №2 составила примерно 20 В. На рис. 3 приведена зависимость световой отдачи от прямого тока макетных образцов лампы с различными образцами СИЭ.

В целом, из полученных данных можно сделать следующие выводы:

– критическим значением тока для СИЭ является 20 мА, следовательно, областью допустимого форсирования может быть значение прямого тока 10 мА, которое не приведёт к интенсификации отказов, не связанных с факторами, воздействующими на СИЭ в процессе эксплуатации.

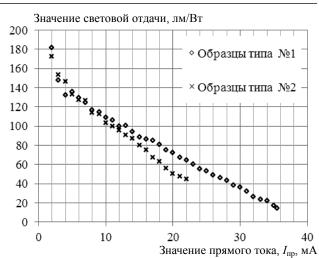


Рис. 3. Зависимость световой отдачи от прямого тока макетных образцов светодиодных ламп

**Определение температурного коэффициента напряжения** для **СИЭ.** Для определения ТКН СИЭ и светодиоды по 5 шт. установлены в лабораторную печь, подключены к источникам-измерителям питания. Установлены значения прямого тока 10 мA. С шагом  $1 \, ^{\circ}\text{C}$  производилось увеличение температуры от  $25 \,$  до  $200 \, ^{\circ}\text{C}$ .

Получены зависимости напряжения от температуры, при стабилизированном значении прямого тока светодиодов с одним кристаллом и СИЭ с 28 последовательно подключенными аналогичными кристаллами. Зависимость напряжения от температуры СИЭ показана на рис. 4.

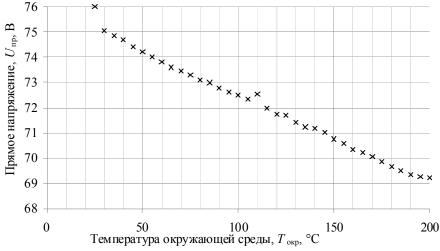


Рис. 4. Зависимости напряжения от температуры для СИЭ при значении прямого тока 10 мА

Рассчитан ТКН, который для СИЭ составляет минус 0,037 В/°С, а для светодиода — минус 0,003 В/°С. Разница в значении ТКН между СИЭ с 28 кристаллами и светодиодом с одним кристаллом составила 12 раз, это связано с нагревом СИЭ за счёт большого количества кристаллов и их близкого расположения друг к другу.

ТКН СИЭ важный параметр для выбора устройства питания лампы-«драйвера», поэтому представленные результаты будут полезны для производителей светодиодной лампы.

Расчёт тепловых режимов СИЭ и прогнозирование срока службы. Можно оценить способность отвода тепла от активной области кристалла, используя следующие формулы для определения теплового сопротивления [1–3]:

$$P_e = \frac{(T_1 - T_2)}{R_t},\tag{1}$$

где  $P_e$  – мощность, рассеиваемая в данном компоненте;  $T_1$ ,  $T_2$  – значения температуры двух тел или тела и среды ( $T_1$  – более высокая температура, чем  $T_2$ );  $R_t$  – тепловое сопротивление.

Для слоевой структуры тепловое сопротивление каждого слоя приближённо оценивается по формуле [1–3]:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda \cdot S},\tag{2}$$

где  $\delta$  – толщина слоя (м); S – площадь слоя (м<sup>2</sup>);  $\lambda$  – теплопроводность вещества (Вт/м·К).

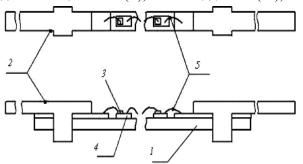


Рис. 5. Конструкция СИЭ

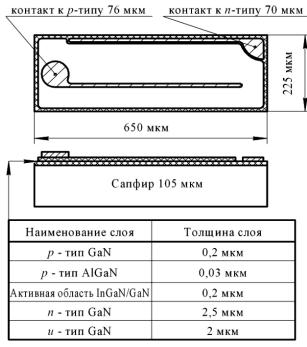


Рис. 6. Структура кристалла

На рис. 5 представлена конструкция СИЭ, которая состоит из основания (1), торцевых выводов (2), последовательно соединённых светодиодных кристаллов (кристаллы планарного типа на основе твёрдых растворов GaN, выращенные на сапфировой подложке) (3), приклеенных теплоэлектропроводящим клеем на металлизированные площадки (4). Светодиодные кристаллы соединены последовательно металлическими проволоками (5). Основание с кристаллами окружено люминофорной композицией (на рис. 5 не показано).

Так как теплопроводность люминофорной композиции, примерно на 90% состоящей из компаунда на основе силикона, не превышает 0,05 Вт/м-К, считаем, что отвод тепла осуществляется по пути наименьшего теплового сопротивления через подложку на металлическое основание СИЭ. Электрическая нагрузка на один кристалл составляет: прямое напряжение 2,9 В, прямой ток 10 мА, таким образом, потребляемая мощность составляет 29 мВт. При таких электрических режимах работы и габаритных размерах кристалла  $650 \times 225 \times 110$  мкм<sup>3</sup>, его КПД составит не менее 50%, из этого следует, что 50% сгенерируется в виде оптического излучения и 50% – в виде теплового. По данным. представленным производителями кристаллов (рис. 6) [10], температура p-n-перехода не должна превышать 125 °C. Исходя из указанных данных, можно провести оценочный расчёт тепловых режимов работы СИЭ в первом приближении с учётом отсутствия конвекции в колбе лампы.

Основное выделение тепла происходит в активной области кристалла GaN со значением теплопроводности  $\sim 1,3$  Вт/м·К, тепловой поток проходит от активной области через n тип и u тип полупроводника со значениями толщины, указанными на рис. 5, затем через сапфир ( $Al_2O_3$  теплопроводность 46 Вт/м·К), металлизацию и теплопроводящий клей на металлическое основание СИЭ. Рассчитаем тепловое сопротивление кристалла, представив светодиодный кристалл в виде схемы, подобной электрической эквивалентной, последовательных сопротивлений, где каждый слой (в зависимости от материала) является сопротивлением. На основе данных значений теплопроводности материалов и их толщин по формуле (2) проведён расчёт теплового сопротивления кристалла (p-n-переход — металлизация), которое составляет 31 К/Вт. Далее из кристалла тепловой поток проходит через теплопроводящий клей на металлическое основание. Теплопроводность клея составляет примерно 60 Вт/м·К, толщина клея не более 30 мкм, тогда тепловое сопротивление СИЭ составит 33,87 К/Вт. По данным от производителя (фирма Engled) аналогичных СИЭ тепловое сопротивление их изделий составляет 45 К/Вт, что косвенно подтверждает достоверность проведённых оценочных расчётов.

По формуле (3) проведём расчёт температуры *p*–*n*-перехода [3, 4]:

$$T_{p-n} = T_{\text{OKP}} + (R_t \cdot P_e), \tag{3}$$

где $T_{p-n}$  – температура p–n-перехода (°C);  $T_{\rm окр}$  – температура окружающей среды (°C).

При  $T_{\text{окр}} = 25$  °C температура p–n-перехода  $T_{p-n} = 25 + (33,87 \times 0,029) = 25,9$  °C.

Соответственно по формуле (3) определим значения температуры p–n-перехода, которая составляет для варианта лампы с двумя СИЭ 51,8 °C, а с четырьмя СИЭ 102,7 °C.

Согласно методике [4] ускоренные испытания для определения срока службы светодиодов предусматривают форсирование, приводящее к интенсификации физико-химических процессов деградации светодиодов без изменения основных механизмов отказов.

Коэффициент ускорения определяется энергией активации отказов ( $E_a$ ).

$$K_{\mathbf{y}} = \exp\left[\left(\frac{E_{\mathbf{a}}}{kT}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{p-n} + 273}\right) - \left(\frac{1}{T_{p-n\,\mathbf{y}} + 273}\right)\right],\tag{4}$$

где  $K_{\rm y}$  – коэффициент форсирования ускоренных испытаний;  $E_{\rm a}$  – энергия активации отказов, эВ; k – постоянная Больцмана;  $T_{p-n}$  – температура p–n-перехода в нормальных условиях эксплуатации (в рабочем режиме), °C;  $T_{p-n}$  у – температура p–n-перехода в ускоренном режиме испытаний, °C.

Номинальное время наработки  $t_{\text{ном}}$  (срок службы СД) определяют по уравнению (5), задав коэффициент форсирования  $K_{\nu}$ , исходя из режимов ускоренных испытаний [4]:

$$T_{\text{HOM}} = t_{\text{V}} \cdot k_{\text{V}},\tag{5}$$

где  $t_{v}$  – время испытаний в ускоренном режиме.

Значение времени наработки в ускоренном режиме не должно быть меньше 1000 ч.

Построим график прогнозируемого срока службы для лампы с одним, двумя и четырьмя СИЭ, значение энергии активации отказов для типовых светодиодов составляет примерно 0,75 эВ, данное значение будет использоваться для дальнейших расчётов (рис. 7). График построен в Мs Excel для заданных значений температур от 25 до 80°C и на основе формул (4), (5).

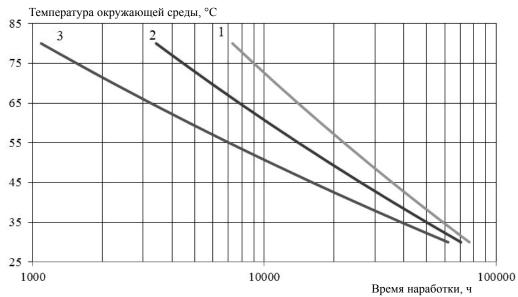


Рис. 7. Зависимость срока службы от температуры для: лампы с одним СИЭ – 1; лампа с двумя СИЭ – 2; лампа с четырьмя СИЭ – 3

Из рис. 7 видно, что для всех вариантов лампы срок службы превышает шестьдесят тысяч часов. Это соответствует мировому уровню разработок в данной области [5–7].

**Заключение.** На основе проведенных расчётов и исследований можно сделать следующие выводы:

1. По результатам анализа зависимостей светового потока, световой отдачи и прямого напряжения СИЭ от прямого тока установлено, что тепловое разрушение начинает проявляться при прямом токе 14 мА для конструкций с металлокерамическим основанием и при токе 20 мА – с металлическим основанием. Таким образом, для изготовления СИЭ следует применять металлическое основание.

- 2. Критическим значением тока для СИЭ является значение 20 мA, следовательно, областью допустимого форсирования может быть значение прямого тока 10 мA, которое не приведёт к интенсификации отказов, не связанных с факторами, воздействующими на СИЭ в процессе эксплуатации.
- 3. Экспериментально определен ТКН, который для СИЭ с 28 кристаллами составил  $0.037 \, \mathrm{B}/^{\circ}\mathrm{C}$ , а для светодиода с одним аналогичным кристаллом  $0.003 \, \mathrm{B}/^{\circ}\mathrm{C}$ , что в 12 раз меньше, чем у СИЭ, поскольку на ТКН СИЭ оказывает влияние нагрев за счёт большого количества кристаллов и их близкого расположения друг к другу, а также последовательное соединение кристаллов.
- 4. В первом приближении проведены тепловые расчёты конструкции СИЭ с учётом отсутствия конвекции и отводом тепла только через места контактной сварки к опорной конструкции внутри колбы лампы. По результатам тепловых расчётов установлено: тепловое сопротивление СИЭ составит 33,87 К/Вт, что на 25% меньше, чем у аналогов; температура p-n-перехода составила 25,9 °C на одном СИЭ в колбе лампы при окружающей температуре 25 °C; при аналогичных условиях для лампы с двумя СИЭ температура составит 51,8 °C, а с четырьмя СИЭ 102,7 °C.
- 5. Проведён расчёт срока службы СИЭ в зависимости от температуры окружающей среды. Для всех трёх вариантов лампы (с одним, двумя и четырьмя СИЭ в колбе) срок службы превышает шестьдесят тысяч часов.

Работа поддержана Минобрнауки России в рамках проекта RFMEFI57714X0061.

#### Литература

- 1. Гончарова Ю.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность / Ю.С. Гончарова, И.Ф. Гарипов, В.С. Солдаткин // Доклады ТУСУРа. -2013. № 2 (28). C. 51–53.
- 2. Вилисов А. Белые светодиоды / А. Вилисов, К. Калугин, В. Солдаткин, Е. Перминова // Полупроводниковая светотехника. -2012. Т. 4. № 18. С. 14–17.
- 3. РД 11 0755–90. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность. Микросхемы интегральные. Отраслевой руководящий документ. М., 1990. 91 с.
- 4. ОСТ 11-336.938–83. Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безот-казность и долговечность [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/ost/1057/info/23239, свободный (дата обращения: 10.09.2015).
- 5. Смирнов С.В. Температурная зависимость спектров излучения светодиодов белого свечения на основе нитрида галлия и его твердых растворов / С.В. Смирнов, Е.В. Саврук, Ю.С. Гончарова // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2(24), ч. 2. С. 55–58.
- 6. Сушков П. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твёрдых растворов AlGaInN / П. Сушков, С. Никифоров // Полупроводниковая светотехника. -2011. -№ 3. -C. 10–13.
- 7. Никифоров С.Г. Прогноз срока службы и изменения параметров промышленных светодиодов при наработке с помощью фотометрического метода // Инновации и инвестиции. -2015. -№1. C. 152-156.
- 8. Zinovchuk A.V. The effect of current crowding on the heat and light pattern in high-power AlGaAs light emitting diodes / A.V. Zinovchuk, O.Yu Malyutenko, V.K. Malyutenko, A.D. Podoltsev, A.A. Vilisov. // Journal of Applied Physics. 2008. Vol. 104, № 3. P. 033115.
- 9. Закгейм А.Л. Низкочастотный шум в исходных и деградировавших синих InGaAs/Gan-светодиодах / А.Л. Закгейм, М.Е. Левинштейн, В.П. Петров, А.Е. Черняков, Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт // Физика и техника полупроводников. -2012. Т. 46. № 2. С. 219-223.
- 10. Официальный сайт фирмы Epistar [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.epistar.com.tw/index en.php, свободный (дата обращения: 10.09.2015).

Доклады ТУСУРа, № 3 (37), сентябрь 2015

## Солдаткин Василий Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ) ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 70-15-13

Эл. почта: soldatkinvs@main.tusur.ru

#### Ряполова Юлия Витальевна

Ассистент каф. РЭТЭМ Тел.: 8-952-883-70-61

Эл. почта: yuliya.ryapolova@mail.ru

### Афонин Кирилл Нильевич

Магистрант каф. РЭТЭМ Тел.: 8-953-913-25-51 Эл. почта: pa3z@mail.ru

#### Олисовец Артём Юрьевич

Инженер каф. РЭТЭМ Тел.: 8-52-897-66-89 Эл. почта: celll@list.ru

#### Туев Василий Иванович

Д-р техн. наук, зав. каф. РЭТЭМ Тел.: 8 (382-2) 70-15-06

Эл. почта: tvi retem@main.tusur.ru

Soldatkin V.S., Ryapolova Y.V., Afonin K.N., Olisovets A.Y., Tuev V.I. Life duration analysis of the LED emitting elements (LED filament)

This article presents the results of aimed to determine the life duration of the lamp with one, two and four LED radiating elements (SEI) which is mounted in a glass incandescent bulb with E27 base, depending on the ambient temperature. The authors also analyzed the basic lighting and electrical characteristics and specified the results of thermal calculation.

Keywords: LED filament, gallium nitride, heat, service life, LED filament lamp.