

УДК.628.984

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

**Т. Н. САВКОВА, А. И. КРАВЧЕНКО, Е. Н. ПОДДЕНЕЖНЫЙ,  
Ю. Н. КОЛЕСНИК, С. Н. КУХАРЕНКО, В. М. ЛУКАШОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

В ряде случаев (например, при аварийном освещении транспортных средств, создании стробоскопического эффекта и т. д.) светодиоды (СД) применяются в импульсном режиме работы. Исследование энергетических и оптических характеристик светодиодных источников излучения при импульсном возбуждении продиктовано отсутствием этих параметров в спецификациях производителей и осуществляется также с целью поиска условий снижения нагрева в области р-п-перехода СД, повышения эффективности и срока службы светотехнических устройств на основе СД.

Авторами [1] проведены относительные измерения средней мощности излучения светодиода при импульсном возбуждении и питании постоянным током, которая оценивалась по сопротивлению фоторезистора, регистрирующего излучение, без учета углового распределения светового потока, температурного режима светодиода и фоторезистора, а также без учета соответствия спектров излучения источника спектральной чувствительности приемника излучения. Результаты таких измерений привели к ошибочному заключению о линейной зависимости сопротивления фоторезистора от потребляемой мощности светодиодом, которая прямо пропорциональна мощности излучения.

В работе [2] определена зависимость светоотдачи от прямого и пульсирующего тока с частотой переключений в диапазоне от постоянного тока до 10 МГц и разработаны рекомендации по эксплуатации светодиодов при больших значениях прямого тока через р-п-переход.

Определение коэффициента полезного действия (КПД) светодиодов [3] выполнено методом одновременного сравнения, где сопоставлены нормы разности двух кривых напряжения на светодиоде, получаемых при изменении сопротивления проводника от воздействия импульсного тока положительной и отрицательной полярности. Однако данная методика позволяет определять КПД только при определенном соотношении «сигнал–шум» на участках остывания полупроводника.

В работах [4], [5] представлены результаты исследования зависимости мощности излучения от плотности тока светодиодов на основе гетероструктур InGaN и AlGaInP в импульсном режиме, исключая нагрев активной области кристалла. Измерение мощности излучения осуществлялось в конце импульса тока длительностью 1 и 10 мкс при частоте повторения 1 кГц и 100 Гц. Однако эти измерения проводились для малых токов и мощностей при допущении отсутствия разогрева активной области СД.

Исследование тепловых процессов, происходящих при питании светодиодов импульсным током, и влияние этих процессов на светотехнические и электротехнические характеристики приведены в работе [6]. Автор утверждает, что увеличение частоты питающего тока приводит к снижению нагрева активной области кристалла при равных скважностях.

Целью данной работы является исследование энергетических и оптических характеристик мощных светодиодов при импульсном возбуждении.

### Основная часть

Измерение энергетических параметров холодно-белых коммерчески доступных светодиодов (табл. 1, 2) проводилось методом интегрирующей сферы на испытательном фотометрическом стенде, изображенном на рис. 1, с использованием фотометрического шара (1), имеющего достаточно большой диаметр, покрытого изнутри слоем  $\text{BaSO}_4$ , рассеивающим свет в соответствии с законом Ламберта. Этот метод позволяет проводить измерения светового потока источника с произвольным распределением излучения в окружающем пространстве на порядок быстрее, чем гониометрический метод [7], [8]. Мощность излучения СД прямо пропорциональна освещенности интегрирующей сферы с учетом ее коэффициента [9].

Световой поток исследуемого СД (3) сравнивался со световым потоком эталонного СД (4), поверенного при использовании калиброванного спектрорадиометрического комплекса с интегрирующей сферой DTF-320-201 [10].

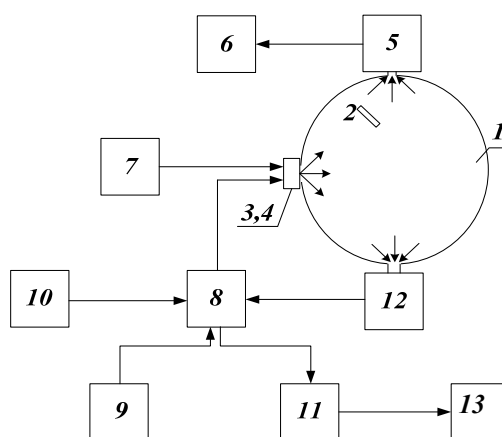


Рис. 1. Структурная схема испытательного фотометрического стенда:

- 1 – интегрирующая сфера; 2 – экран; 3 – исследуемый светодиод; 4 – эталонный светодиод с радиатором; 5 – фотометрическая головка люксметра «ТКА-Люкс»; 6 – блок обработки сигналов люксметра «ТКА-Люкс»; 7 – блок стабилизации заданного температурного режима СД; 8 – коммутационное устройство с усилителем мощности; 9 – источник постоянного тока; 10 – генератор RigolDG 4062; 11 – осциллограф RigolDS 2072; 12 – фотодиод ФД-7К; 13 – персональный компьютер (ПК)

Косвенные измерения светового потока проводились калиброванным люксметром «ТКА-Люкс» (5, 6) в диапазоне 0–200000 Лк. Световой импульс измерялся фотодиодом ФД-7К (12) в режиме преобразователя светового потока в ток.

В качестве источника управляющего сигнала использован генератор Rigol DG 4062 (10). Формируемый генератором сигнал поступает на вход усилителя мощности, схема которого приведена на рис. 2. Усилитель позволяет задавать значение тока, воздействующего на светодиод до уровня 20 А.

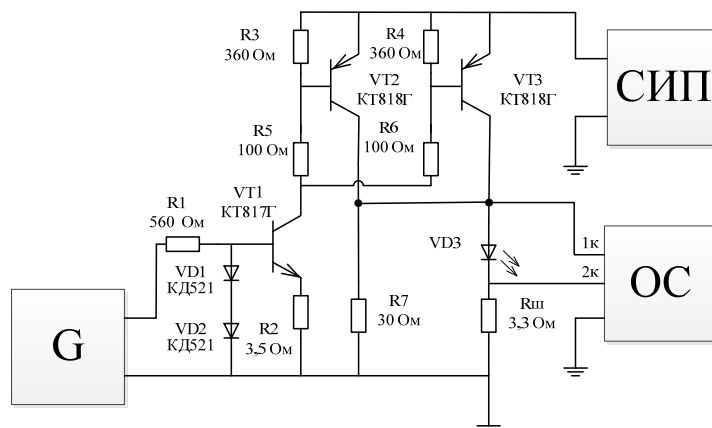


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема подключения исследуемого светодиода

Управляющий сигнал с генератора –  $G$  поступает в базу транзистора  $VT1$ . Транзистор  $VT1$  включен по схеме источника тока, значение которого задано сопротивлением резистора  $R2$ . Применение источника тока в усилителе позволяет стабилизировать уровень управляющего сигнала выходными транзисторами  $VT2$ ,  $VT3$ . Стабилизация тока позволяет исключить влияние напряжения питания на режим работы выходных транзисторов, что, в свою очередь, позволяет изменять ток исследуемого светодиода регулировкой выходного напряжения стабилизированного источника напряжения (СИП). Резисторы  $R5$  и  $R6$  ограничивают мощность, рассеиваемую транзистором  $VT1$ . Резисторы  $R3$ ,  $R4$ ,  $R7$  предназначены для уменьшения времени переключения выходных транзисторов. Резистор  $R_{ш}$  предназначен для преобразования выходного напряжения усилителя в ток светодиода с последующей регистрацией значения тока цифровым осциллографом.

Измерение параметров импульсов проводились с использованием цифрового осциллографа Rigol DS 2072 (11) (ОС), с дискретизацией – 7000 точек на осциллограмму (период). Для уменьшения погрешностей, вызванных шумом сигналов, использовано усреднение по 8000 осциллограмм.

Эффективные значения напряжения были определены как среднеквадратичное значение на периоде повторения [11]:

$$U_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\Pi}} \cdot \int_0^{T_{\Pi}} u^2 dt} = u \sqrt{\frac{1}{T_{\Pi}} \cdot \int_0^{t_{\text{imp}}} dt} = u \sqrt{\frac{t_{\text{imp}}}{T_{\Pi}}}, \quad (1)$$

где  $T_{\Pi}$  – период повторения;  $t_{\text{imp}}$  – длительность импульса напряжения;  $u$  – среднее значение амплитуды импульса напряжения.

Исходя из этого, потребляемая мощность СД при импульсном напряжении прямоугольной формы определяется по формуле [12]:

$$P = U_{\text{эф}} I_{\text{эф}} = u i \frac{t_{\text{imp}}}{T_{\Pi}}. \quad (2)$$

Потребляемая мощность СД и параметры световых импульсов определялись в программной среде Mathcad 15 [13]. После чтения данных из осциллографа и присвоения им необходимых переменных, с помощью организации вложенных циклов определялись длительность периода импульсов напряжения и тока, длительности

самих импульсов, коэффициент заполнения [14]. Исходными данными для алгоритма являются количество точек измерения и значения в точках измерения. Завершающими операциями алгоритма является расчет мощности, потребляемой СД, по определенным эффективным значениям напряжения.

Результаты исследований зависимости оптической мощности и рассеиваемой мощности от тока при импульсном возбуждении разной длительности импульсов с частотой 1 кГц для светодиода типа ARLP-Star-3W при фиксированном температурном режиме показаны на рис. 3. Как видно из графиков, зависимости имеют линейные и сублинейные участки. Линейная зависимость наблюдается вплоть до тока 0,04 А (рис. 4). До этого значения тока яркость светодиода практически не зависит от режима теплоотвода. Тем не менее, и при этих токах происходит падение эффективности с ростом тока, что обусловлено туннелированием электронов «над» или «под» квантовой ямой и их безызлучательной рекомбинацией с дырками на гетерограницах InGaN/GaN [15]. С увеличением тока более 0,04 А и длительности импульса мощность излучения падает. Появление сублинейной зависимости  $P(I)$  с увеличением тока может быть представлена в степенном виде  $P \sim I^n$  [16], что обусловлено двумя причинами – нагревом активной области и увеличением потерь тока за счет оже-рекомбинации. В том случае, когда выполняется условие  $0,667 \leq n \leq 0,9$ , сублинейность определяется оже-рекомбинацией, а если  $n \leq 0,667$  – сублинейность определяется нагревом и оже-рекомбинацией. Различие в мощности излучения наблюдается при  $I > 0,102$  А и длительности импульса 400 мкс ( $n = 0,668$ ); при  $I > 0,44$  А и длительности 200 мкс ( $n = 0,6638$ ); при  $I > 0,832$  А и длительности 150 мкс ( $n = 0,665$ ); при  $I > 0,177$  А и длительности 100 мкс ( $n = 0,67$ ); при  $I > 0,387$  А и длительности 50 мкс ( $n = 0,6645$ ).

Зависимость мощности насыщения от тока отражает те же процессы, но показатель степени больше 1 и изменяется от 1,25 до 1,55. С увеличением длительности импульса зависимость тепловых потерь от тока приближается к той же зависимости при непрерывном режиме, что указывает на увеличение тепловых потерь и увеличение степени нагрева активной области кристалла.

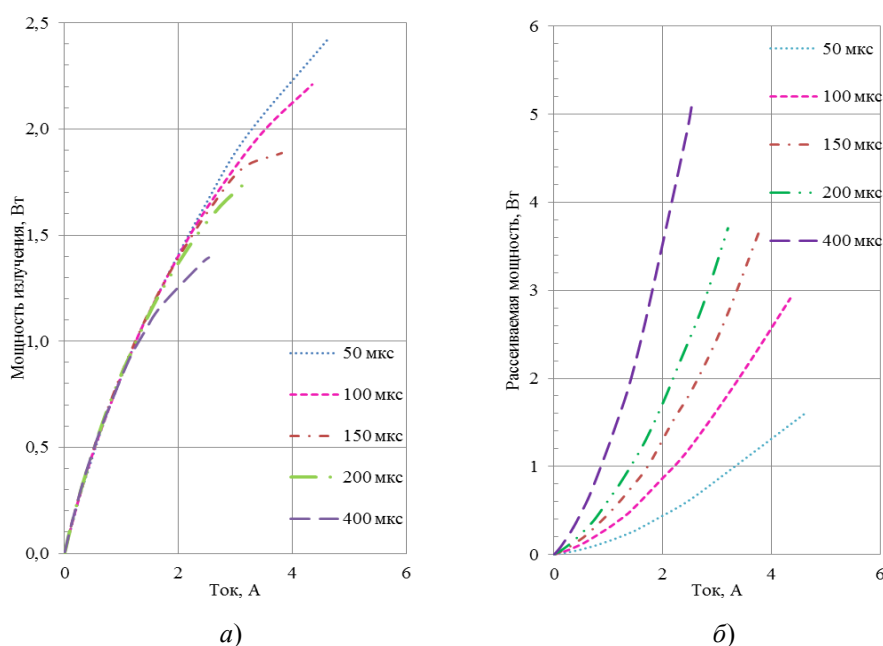


Рис. 3. Графики зависимости для LED-003W-13C-220-240LM-B-PS Bridgelux, USA:  
 а – оптической мощности излучения от тока инжекции;  
 б – мощности рассеивания от тока инжекции

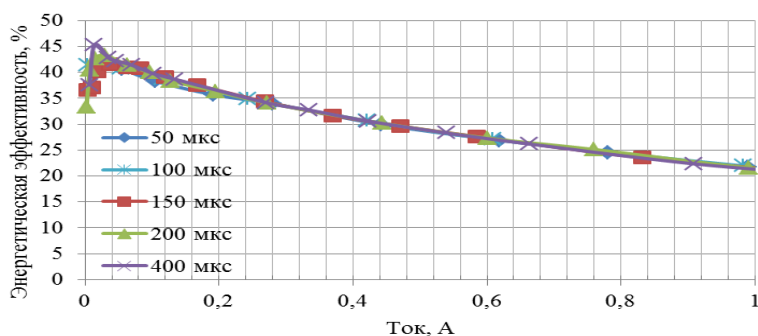


Рис. 4. График зависимости энергетической эффективности от тока в импульсе при различных длительностях возбуждающего импульса с частотой 1 кГц

В табл. 1 приведены расчетные значения основных энергетических и оптических характеристик СД мощностью 3 Вт при возбуждении импульсами прямоугольной формы с частотой следования 1 кГц и скважностью 10. Измерения проводились при  $t_{окр} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и токе в импульсе около 2 А. Сравнивая основные характеристики, мы видим, что наиболее эффективным является ARLP-Star-3W-EPS White. Данный СД отличается наибольшей энергетической эффективностью – около 14,8 %, наименьшими тепловыми потерями, хотя мощность излучения не является наибольшей при данном токе. Вместе с тем максимальная энергетическая эффективность значительно превосходит этот параметр представленных СД.

Таблица 1

**Параметры основных характеристик СД мощностью 3 Вт при возбуждении импульсами прямоугольной формы с длительностью 100 мкс и частотой следования 1 кГц**

Тип светодиода	ARLP-Star-3W-EPS White	LED-003W-13C-220-240LM-B-PS Bridgelux, USA	LED-003W-14C-220-240LM-B-PS Bridgelux, USA
Эффективное значение напряжения $U_{эф}$ , В	1,435	1,58	1,628
Эффективное значение тока $I_{эф}$ , А	0,648	0,62	0,678
Потребляемая мощность Led, Вт	0,929	1	1,103
Энергетическая эффективность, %	14,8	13,75	12,35
Рассеиваемая мощность, Вт	0,791	0,87	0,967
Мощность излучения в импульсе, Вт	1,375	1,4	1,362
Максимальная энергетическая эффективность, % (ток в импульсе, А)	53,85 ( $6,25 \cdot 10^{-3}$ )	41,35 ( $3,684 \cdot 10^{-3}$ )	38,42 (0,019)

Основные энергетические и оптические характеристики СД мощностью 1 Вт при возбуждении импульсами прямоугольной формы с частотой следования 1 кГц и скважностью 10 представлены в табл. 2. Энергетическая эффективность исследуемых диодов изменяется в диапазоне от 8 до 30 % при фиксированном значении импульсного тока в 1 А. Светодиод типа SPHWH2L3D30CD фирмы Samsung отличается наибольшими значениями энергетической эффективности, мощности излучения в импульсе, низкими тепловыми потерями.

Таблица 2

Параметры основных характеристик СД мощностью 1 Вт при возбуждении импульсами прямоугольной формы с длительностью 100 мкс и частотой следования 1 кГц

Тип светодиода	LUWJDSH-EC-FQFS-5E8 Osram	SPMNHT541MD5WAPOS 3 AIP3S3 Samsung	YBDAWT-0-300-050-02-0001 Cree	AC-1LED-001W-13C-110-120LM-EL-PS, Taiwan	ARLP-Star-1W-EPS White	LH351A (3535) Samsung	SPHWH2 L3D30CD 4RTM3D4 R2M1 Samsung
Эффективное значение напряжения $U_{эф}, В$	1,87	1,554	1,135	1,4	1,23	1,046	1,038
Эффективное значение тока $I_{эф}, А$	0,32	0,33	0,343	0,3	0,33	0,34	0,305
Потребляемая мощность Led, Вт	0,596	0,5	0,389	0,427	0,39	0,34	0,317
Энергетическая эффективность, %	8,38	15,5	17,47	15,98	22,1	27,8	30,58
Рассеиваемая мощность, Вт	0,556	0,435	0,321	0,36	0,313	0,245	0,22
Мощность излучения в импульсе, Вт	0,508	0,77	0,68	0,68	0,88	0,93	0,97
Максимальная энергетическая эффективность, % (ток в импульсе, А)	33,63 (0,014)	50,69 (0,011)	31,085 (0,152)	38,37 (0,025)	41,7 (0,029)	41,7 (0,054)	51,26 (0,017)

Проводилось также исследование зависимости мощности излучения СД от частоты возбуждающего импульса длительностью 50 мкс в диапазоне частот от 100 до 12000 Гц (рис. 5). Как оказалось, оптическая мощность излучения практически не зависит от частоты следования сигнала в этом диапазоне.

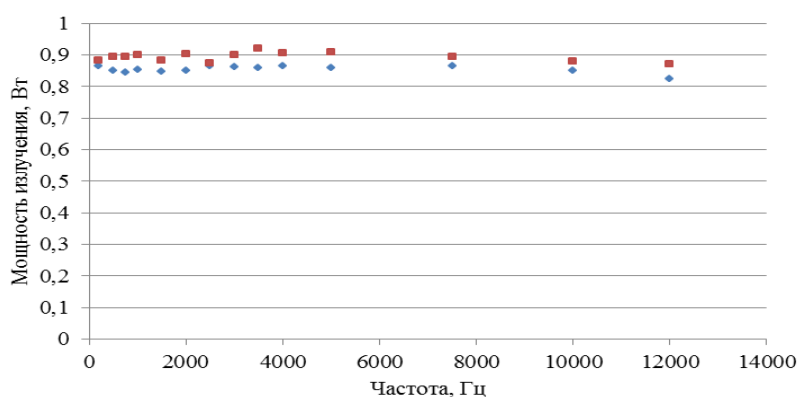


Рис. 5. Зависимость мощности излучения СД от частоты возбуждающих импульсов при длительности импульса 50 мкс и мощности 10 Вт

### Заключение

Исследованы оптические и энергетические характеристики коммерчески доступных светодиодов мощностью 1 и 3 Вт при импульсном режиме возбуждения.

Анализ зависимости излучаемой мощности от тока возбуждения обнаруживает участки линейной и сублинейной зависимости. Уменьшение мощности излучения

на сублинейном участке обуславливается оже-рекомбинацией и нагревом активной области светодиода.

Установлено, что оптическая мощность излучения практически не зависит от частоты следования сигнала в диапазоне от 100 до 12000 Гц для импульсов длительностью 50 мкс.

### Литература

1. Гафуров, Х. Г. Зависимость энергетических характеристик светодиода от временных параметров сигнала питания / Х. Г. Гафуров, Ф. Х. Гафуров, М. Каюмова // Ученые зап.: естеств. и экон. науки. – 2012. – № 2 (21). – С. 20–26.
2. Скрипниченко, А. Импульсное питание светодиодов CreeXLamp с повышенным током / А. Скрипниченко // Полупроводник. светотехника. – 2011. – № 1. – С. 16–19.
3. Картамышев, А. В. Метод восстановления формы сигнала для системы измерения параметров Led : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 23.10.2008 / А. В. Картамышев ; С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. – СПб., 2008. – 18 с.
4. Архипов, А. Л. Исследования зависимости квантового выхода светодиодов на основе AlGaInN от плотности тока в неразогреваемом режиме / А. Л. Архипов, С. Г. Никифоров // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы : материалы 5 Всерос. конф., Санкт-Петербург, 2007 г. / С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. ; под. ред. П. К. Кашкарова [и др.]. – СПб., 2007. – С. 69–70.
5. Никифоров, С. Особенности определения квантового выхода светодиодов на основе AlGaInN и AlGaInP при различной плотности тока через излучающий кристалл / С. Никифоров, А. Архипов // Компоненты и технологии. – 2008. – № 1. – С. 82–85.
6. Мышонков, А. Б. Исследование характеристик светодиодных источников света при питании импульсным током : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 16.05.2012 / А. Б. Мышонков ; Мордов. гос. ун-т им. Н. П. Огарева. – Саранск, 2012. – 22 с.
7. Кузмин, В. Приборы для измерения оптических параметров и характеристик светодиодов / В. Кузмин, В. Антонов, О. Круглов // Полупроводник. светотехника. – 2010. – № 3. – С. 26–30.
8. Светодиоды. Методы измерения фотометрических характеристик : ГОСТ Р 8.749–2011. – Введ. 01.05.01. – М. : Федер. агенство по техн. регулированию и метрологии : Стандартинформ, 2014. – 14 с.
9. Баковец, Н. В. Метод калибровки фотометрического шара / Н. В. Баковец, Д. В. Скумс, О. Б. Тарасова // Метрология и приборостроение. – 2014. – № 4. – С. 11–16.
10. Савкова, Т. Н. Измерение энергии тепловых потерь мощного светодиодного модуля / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2013. – № 1. – С. 55–60.
11. Справочник по электрическим конденсаторам / Акад. наук МССР, отд. энергет. кибернетики ; под. ред. В. В. Ермуратского. – Кишинев : Изд-во «Штинца», 1982. – 308 с.
12. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учеб. для электротехн., энергет., приборостр. специальностей вузов / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1996. – 640 с.

13. Mathcad 14 для студентов и инженеров. Русская версия: Валерий Очко. – М., БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.
14. Фотометрия импульсная. Термины и определения : ГОСТ 24286–88. – Введ. 01.01.90. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам : Изд-во стандартов, 1988. –15 с.
15. Влияние джоулева разогрева на квантовую эффективность и выбор теплового режима / А. А. Ефремов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, вып. 5. – С. 621–627.
16. Мощные светодиоды, излучающие в области длин волн 1,9–2,1 мкм / Т. Н. Данилова [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, вып. 2. – С. 239–242.

*Получено 02.04.2015 г.*