

COLORIMETRIC METHOD OF DETERMINING THE TEMPERATURE OF THE ACTIVE REGION OF HIGH – POWER LEDs

Savkova T.,

Assistant, Department of Electricity,

P.O. Sukhoi State Technical University of Gomel, Belarus

Kravchenko A.,

Associate Professor, Department of General Physics, PH. D.

in Physics and Mathematics, P.O. Sukhoi State Technical University of Gomel, Belarus

Kukhareenko S.

Senior lecturer, Department of Industrial Electronics,

P.O. Sukhoi State Technical University of Gomel, Belarus

Kalesnik Y.

The Head of the Upgrading and Retraining Institute,

PH.D. in Technical Sciences,

Associate Professor, Department of Electricity,

P.O. Sukhoi State Technical University of Gomel, Belarus

КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ МОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ

Савкова Т.Н.,

Ассистент кафедры «Электроснабжение»,

УО «Гомельский государственный технический университет

им. П.О. Сухого», г. Гомель, Беларусь

Кравченко А.И.,

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика»,

УО «Гомельский государственный технический университет

им. П.О. Сухого», г. Гомель, Беларусь

Кухаренко С.Н.,

Старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника»,

УО «Гомельский государственный технический университет

им. П.О. Сухого», г. Гомель, Беларусь

Колесник Ю.Н.

Директор ИПК и ПК,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение»,

УО «Гомельский государственный технический университет

им. П.О. Сухого», г. Гомель, Беларусь

Abstract

A calorimetric method for determining the temperature of the active region of high-power LEDs is proposed.

Аннотация

Предложен калориметрический способ определения температуры активной области мощных светодиодов.

Keywords: LED, calorimeter, «*p-n*» junction temperature, thermal resistance.

Ключевые слова: светодиод, калориметр, температура «*p-n*» перехода, тепловое сопротивление.

Введение

Конструирование эффективных и надёжных осветительных приборов с использованием светодиодов (СД) взаимосвязано с физическими процессами, происходящими в полупроводниках, которые необходимо учитывать при планировании тепловых, электрических, оптических и спектральных нагрузок источника света[1].

Важнейшая проблема при проектировании световых приборов с СД – обеспечение требуемого теплового режима СД. Большинство параметров СД, в основном определяющие их превосходство над другими источниками света – срок службы и световая отдача – сильно зависят от температуры

«*p-n*» перехода. Температура перехода определяется тепловым сопротивлением, током питания, тепловой мощностью, температурой окружающей среды, качеством изготовления СД и другими параметрами. Превышение температуры «*p-n*» перехода ведёт к уменьшению светового потока и ускоренной деградации кристалла [2–7]. Поэтому измерения температуры «*p-n*» перехода, теплового сопротивления и других тепловых характеристик мощных СД является актуальной задачей.

Существует несколько способов определения температуры «*p-n*» перехода светодиодов, основанные на зависимости прямого напряжения светодиода

ода от температуры [8–14]; методы являются косвенными, контактными, требующие калибровочных измерений.

Стандарт РФ ГОСТ Р 54814 – 2011 устанавливает лишь термины и определения характеризующие светодиоды и светодиодные модули в том числе даёт определение теплового сопротивления обходя термин «температура активной области». В тоже время, методы определения теплового сопротивления по ГОСТ 19656.18 – 84 предназначены для полупроводниковых диодов СВЧ и не обеспечивают достаточной точности определения температуры активной области светодиодов.

Описание методики измерения теплового сопротивления и температуры перехода светодиодов за рубежом распределено между несколькими документами стандарта JESD51 – 1, JESD51 – 50, JESD51 – 51, JESD51 – 52, JESD51 – 53 [15–19]. Метод измерения теплового сопротивления, заключается в пропускании через светодиод ступенчатого импульсного электрического тока и измерении термочувствительного параметра в процессе нагрева до достижения стационарного состояния. Температура активной области определяется косвенным способом на основе измерения падения напряжения на светодиоде при малом измерительном токе. Процедуры тестирования предназначены для светодиодов высокой яркости с потребляемой мощностью более 0,5 Вт и эффективностью преобразования энергии выше 5%, работающие в режиме постоянного тока 100 мА и выше.

Температура «*p-n*» перехода в работе [20] определялась по смещению спектрального максимума излучения в область коротких длин волн при

повышении температуры. Данный метод характеризуется большой погрешностью из-за наличия шумов и возможной интерференции в спектре излучения СИД. Отличительной особенностью способа [21], является определение зависимостей длины волны от температуры для заданных точек в выбранной длинноволновой части спектра излучения светодиода. Для светодиодов, у которых в качестве подложки используется сапфир, температура может быть определена с помощью оптического измерения длин волн линий, излучаемых хромом (Cr³⁺), который находится в подложке в виде примеси [22].

Целью данной работы являлась разработка нового способа определения температуры «*p-n*» перехода мощных светодиодов калориметрическим методом на основании теплофизических расчётов и измерений.

Устройство калориметра и измерительной системы

Определение температуры «*p-n*» перехода проводилось с использованием экспериментальной установки (рис.1), основными элементами которой являются: калориметр, микроконтроллер, блок питания и персональный компьютер. Измерение напряжения на «*p-n*» переходе СД (тока через переход) производилось вольтметром В7 – 40/3 (на рисунке не показан). Управление блоком питания, вольтметром, измерение ЭДС термопар, первичная обработка результатов измерений, а также передача этих данных в ПК, осуществлялась программируемым микроконтроллером «Arduino».

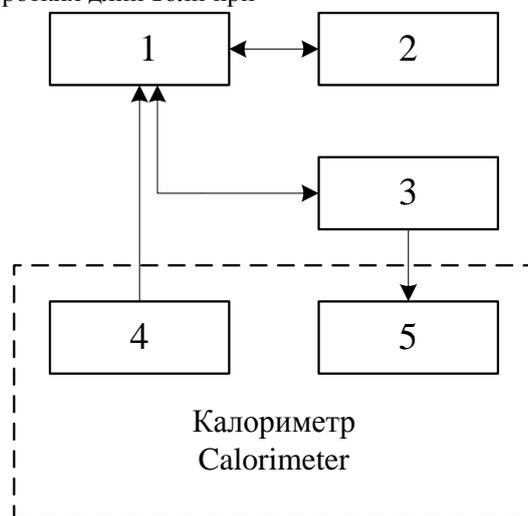


Рисунок 1. Блок – схема экспериментальной установки для измерения температуры «*p-n*» перехода мощного СД: 1 – микроконтроллер; 2 – персональный компьютер; 3 – блок питания; 4 – термопары ($T_1...T_5$); 5 – светодиод (ARPL – 3W6000)

Разработанный калориметр (рис. 2) содержит корпус, радиатор с закреплённым на нём мощным светодиодом, съёмную крышку с технологическим отверстием для вывода энергии светового излучения мощного светодиода, блок управления (рис. 1), соединённый с СД и датчиками температуры, установленными на корпусе калориметра, радиаторе, на

излучающей поверхности, печатной плате и на корпусе мощного СД. Использование радиатора в виде усечённой сферы позволяет уменьшить погрешность определения мощности рассеиваемого тепла поверхностью радиатора.

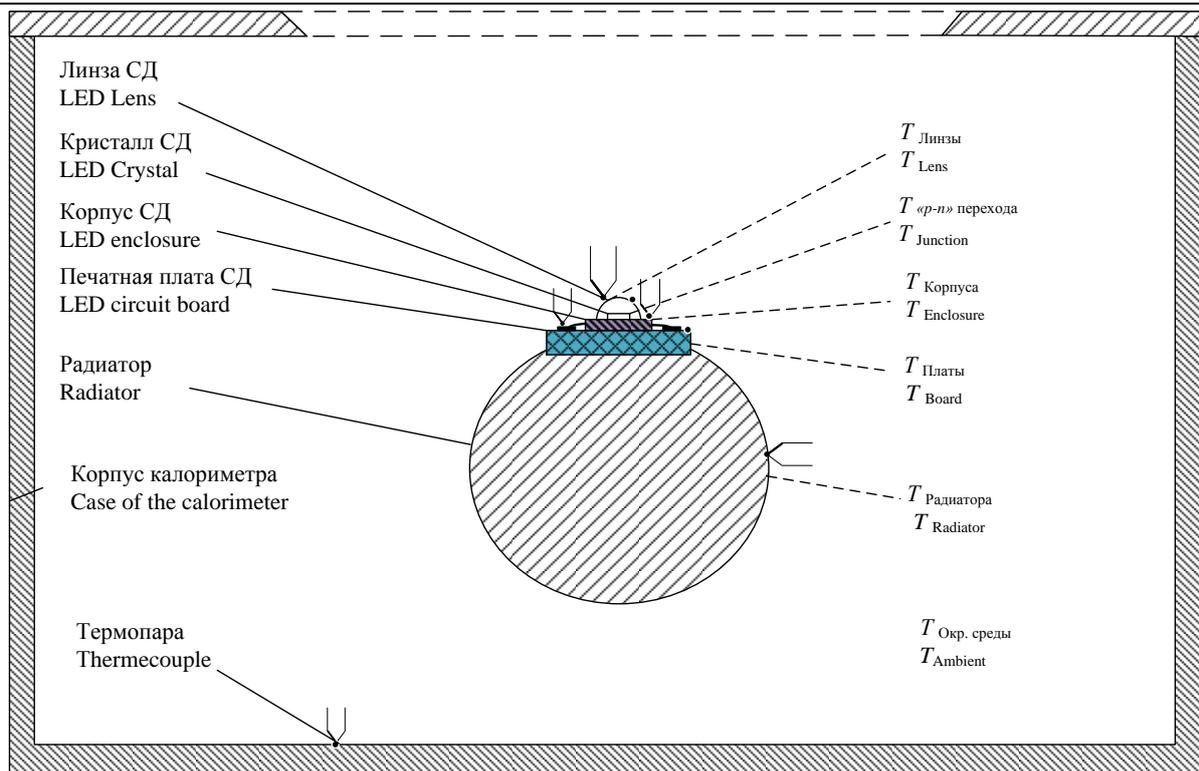


Рисунок 2. Калориметр

Основные положения расчёта

Температура «р-п» перехода СД T_J , находится исходя из того, что тепловая энергия, приходящая от «р-п» перехода путём теплопередачи на поверхность линзы и корпус, или других элементов СД в условиях стационарного режима, рассеивается в окружающую среду тепловым излучением и конвекционными потоками.

Мощности теплового излучения поверхности линзы и корпуса СД на основании закона Фурье определялись соотношениями:

$$P_{TL} = \frac{\lambda_{JL} \cdot S_L}{d_{JL}} \cdot (T_J - T_L) \quad \text{и} \quad P_{TE} = \frac{\lambda_{JE} \cdot S_E}{d_{JE}} \cdot (T_J - T_E),$$

где (1,2)

$$T_{J2} = \frac{P_{TL2} (P_{TE1} (T_{L1} - T_{E1}) + P_{TE1} \cdot T_{E2}) - P_{TE2} P_{TL1} \cdot T_{L2}}{P_{TL2} \cdot P_{TE1} - P_{TE2} \cdot P_{TL1}}, \quad (3)$$

$$T_{J1} = (P_{TL1} / P_{TL2}) \cdot (T_{J2} - T_{L2}) + T_{L1} \quad \text{или} \quad (4)$$

$$T_{J1} = (P_{TE1} / P_{TE2}) \cdot (T_{J2} - T_{L2}) + T_{E1}.$$

Тепловой поток с поверхности линзы и корпуса линзы СД определяется мощностью теплового излучения и конвекции с этих поверхностей:

$$P_{TL} = P_{TL-r} + P_{TL-c} \quad \text{и}$$

$$P_{TE} = P_{TE-r} + P_{TE-c}, \quad \text{где}$$

P_{TL-r} , P_{TE-r} – мощности теплового излучения поверхностей линзы и корпуса СД; P_{TL-c} , P_{TE-c} – мощности, обусловленные конвекционными потоками с поверхностей линзы и корпуса СД.

Мощность теплового излучения поверхности линзы и корпуса СД определялась на основании закона Стефана – Больцмана:

λ_{JL} и λ_{JE} – коэффициенты теплопроводности среды, заполняющей пространство между «р-п» переходом и поверхностями линзы и корпуса СД;

S_L и S_E – площадь поверхностей линзы и корпуса СД; d_{JL} и d_{JE} – средние расстояния от «р-п» перехода СД до поверхности линзы и корпуса; T_J , T_L и T_E – температуры «р-п» перехода, поверхности линзы и корпуса.

Взяв отношение выражений (1) и (2), записанных для двух токов, учитывая, что токам I_1 и I_2 соответствуют температуры «р-п» перехода – T_{J1} и T_{J2} , а температуры T_{L1} , T_{L2} и T_{E1} , T_{E2} измеренные на поверхности линзы и корпуса, соответственно, получим:

$$P_{TL-r} = \alpha_L \cdot \sigma \cdot (T_L^4 - T_A^4) \cdot S_L \quad \text{и}$$

$$P_{TE-r} = \alpha_E \cdot \sigma \cdot (T_E^4 - T_A^4) \cdot S_E, \quad \text{где}$$

α_L , α_E – коэффициенты черноты поверхности линзы и корпуса СД;

σ – постоянная закона Стефана – Больцмана; S_L , S_E – площади поверхностей линзы и корпуса СД; T_A – температура окружающей среды.

Мощность конвекции с этих элементов находим по формуле Ньютона:

$$P_{TL-c} = \gamma_L \cdot (T_L - T_A) \cdot S_L \quad \text{и}$$

$$P_{TE-c} = \gamma_E \cdot (T_E - T_A) \cdot S_E, \quad \text{где}$$

γ_L, γ_E – коэффициенты теплоотдачи поверхности линзы и корпуса СД.

Для определения полной мощности тепловых потерь также рассчитывался тепловой поток с поверхности печатной платы и радиатора.

Тепловой поток в окружающую среду с печатной платы, складывается из потоков с открытых верхней и боковой поверхности платы:

$$P_{TB} = P_{TBt} + P_{TBs}, \text{ где}$$

$$P_{TBt} = P_{TBt-r} + P_{TBt-c} \text{ и здесь}$$

$$P_{TBs} = P_{TBs-r} + P_{TBs-c},$$

$$P_{TBt-r} = \alpha_{Bt} \cdot \sigma \cdot (T_B^4 - T_A^4) \cdot S_{Bt} \text{ и}$$

$$P_{TBs-r} = \alpha_{Bs} \cdot \sigma \cdot (T_B^4 - T_A^4) \cdot S_{Bs} - \text{мощности}$$

теплого излучения с открытой части верхней и боковой поверхности платы СД, а мощности, обусловленные конвекционными потоками:

$$P_{TBt-c} = \gamma_{Bt} \cdot (T_B - T_A) \cdot S_{Bt} \text{ и}$$

$$P_{TBs-c} = \gamma_{Bs} \cdot (T_B - T_A) \cdot S_{Bs}.$$

Аналогично, запишем соотношения для теплового потока с поверхности радиатора P_{TR} :

$$P_{TR} = P_{TR-r} + P_{TR-c}, \text{ где}$$

$$P_{TR-r} = \alpha_R \cdot \sigma \cdot (T_R^4 - T_A^4) \cdot S_R \text{ и}$$

$$P_{TR-c} = \gamma_R \cdot (T_R - T_A) \cdot S_R.$$

Таким образом, полная мощность тепловых потерь «активная область – окружающая среда» определилась суммой:

$$P_{TH} = P_{TL} + P_{TE} + P_{TB} + P_{TR}. \quad (5)$$

Рассчитанные полная мощность тепловых потерь P_{TH} и температура « $p-n$ » перехода T_J позволяют определить тепловое сопротивление «активная область – окружающая среда» (R_{TH}) [17]:

$$R_{TH} = \frac{T_J - T_A}{P_{TH}}. \quad (6)$$

Разность между потребляемой мощностью $P_{el} = U_F \cdot I_F$ и полной мощностью тепловых потерь P_{TH} определяет мощность светового излучения P_{opt} , а энергетическую эффективность η_e СД находим через отношение P_{opt} и P_{el} :

$$P_{opt} = U_F \cdot I_F - P_{TH}, \eta_e = \frac{P_{opt}}{P_{el}}. \quad (7)$$

При расчётах учитывалась температурная зависимость теплопроводности материалов в направлениях: « $p-n$ » переход – поверхность линзы и « $p-n$ » переход – поверхность корпуса СД. Коэффициенты черноты всех элементов поверхности СД были измерены пирометром Testo – 830 – T2, а теплоотдачи определены экспериментально с использованием вторичного эталона, поверенного на аттестованном спектрорадиометрическом комплексе с интегрирующей сферой DTF-320-201.

Заключение

Предложен и разработан способ определения температуры « $p-n$ » перехода мощного светодиода калориметрическим методом на основе теплофизических расчётов и измерений. Способ может быть использован для определения теплового сопротивления, мощности светового излучения, мощности рассеивания и энергетической эффективности СД, позволяет контролировать качество осветительных устройств в процессе производства и эксплуатации, а также оптимизировать испытания вновь спроектированных устройств.

Примером реализации способа определения температуры « $p-n$ » перехода является расчёт теплоэнергетических параметров для светодиода ARPL 3W6000. По измеренным температурам системы: «СД – радиатор – окружающая среда» и в соответствии с выражениями (3–7) определяли температуру активной области в двух режимах. Так, если, ток « $p-n$ » перехода в первом режиме $I_1 = 0,35$ А, а во втором – $I_2 = 0,7$ А, то расчётные значения температуры активной области: $T_{J1} = 89^\circ\text{C}$ и $T_{J2} = 151^\circ\text{C}$. Мощности тепловых потерь: $P_{TH1} = 0,67$ Вт и $P_{TH2} = 1,65$ Вт. Тепловые сопротивления «активная область – окружающая среда», соответственно, составили $R_{TH1} = 103^\circ\text{C}/\text{Вт}$ и $R_{TH2} = 80^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Мощность светового излучения в первом режиме – 0,41Вт, во втором – 0,75 Вт, а энергетическая эффективность соответственно: 38 % и 31 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Менжини, М. Разработка надежных светодиодных источников освещения / М. Менжини, Г. Менжессо, Э. Занони, М. Да Лаго, Н. Тривеллин // Полупроводниковая светотехника, – 2013, №5, – С. 61 – 64.
2. Миранович, В. Мощные светодиоды: особенности применения, проблемы и методы решения на примере светодиодов компании Prolight Opto Technology/ В. Миранович, И. Филоненко // Электронные компоненты, – 2007, №6, – С. 45 – 49.
3. Ежов В. Стандартизация и расчёт тепловых характеристик мощных светодиодов/ В. Ежов// Электронные компоненты. –2009.№6. –С.42–48.
4. Константинов, В.И. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей/ В.И. Константинов, Е.В. Вставская, Т.А. Барбасова, В.О. Волков// Вестник ЮУрГУ. –2010. –Вып. 11, №2,– С.46-51.
5. Астахов, А.А. Оптимизация тепловых режимов в конструкциях световых приборов на полупроводниковых источниках света/ А.А. Астахов, Д.Д. Каримбаев, А.О. Мисюк, В.Г. Христенко// Доклады ТУСУРа – 2011. – №2, – (24), часть2. – С. 81–89.
6. Способ измерения энергии тепловых потерь при испытании мощного полупроводникового светодиода/ Т.Н. Савкова, А.И. Кравченко: патент на изобретение 20248 Респ. Беларусь, МПК Н 01L 21/66 (2006.01), G 01R 31/26 (2014/01) – № а 20131127; заявлен. 30.09.2013; опубл. 13.04.2016.
7. Савкова, Т.Н. Калориметрический способ определения тепловых характеристик мощных све-

тодиодов/ Т.Н. Савкова, А.И. Кравченко, Ю.Н. Колесник //Естественные и технические науки, – 2016, №11, – С. 152 – 155.

8. Xi Y. Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light – emitting diodes using diode forward voltage method / Y. Xi, E.F. Shubert // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 85. – P. 2163.

9. Патент US 2010/0004892 A1 /Ming – Te LIN, Knang – Yu Tai, Jyh – Chen Chen, Farn – Shiun Hwu. Method for Measuring PN – Junction Temperature of Light – Emitting Diode; опубл. 14.01.2009. Бюл. № 12/353, 294.

10. Патент US 2011/0031903 A1 / V. N. Hoang, R. Surdeanu, P. Bracken, B. Bataillou, D. V. Steenwinckel. System and method for estimating the junction temperature of a light emitting diode; опубл. 27.01.2009. Бюл. № 12/863, 744.

11. Патент US 2010/0315019 / G. Hoogzaad, Schmitz, H. M. Wilhelmus, R. Surdeanu. Led driver circuit and method, and system and method for estimating the junction temperature of a light emitting diode; опубл. 27.01.2009. Бюл. № 12/863, 740.

12. Патент US 2009/0306912 A1 / J. – C. Chen, F. – S. Hwu, G. – J. Sheu, K. – C. Chen, F. –L. Lin. Method of measuring LED junction temperature; опубл. 20.08.2008. Бюл. № 12/194, 591.

13. Калориметр/ Т.Н. Савкова, А.И. Кравченко: пат. на полезную модель 10984 Респ. Беларусь, МПК G01K 17/06 (2006.01), H 01L 21/67 (2006.01) – № и 20150360; заявлен 26.10.2015; опубликован 15.12.2015.

14. Патент РФ № 2011147653/ А. Н. Пихтин, С. А. Тарасов, Е. А. Менькович. Способ определения температуры активной области светодиода; опубл. 23.02.2007. Бюл. № 11/678, 243.

15. IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51–1 standard //UNECE [Electronic resource]. – 2001. – Mode of access: <http://www.jedec.org/>.

16. Overview of Methodologies for the Thermal Measurement of Single – and Multi – Chip, Single – and Multi – PN Junction Light – Emitting Diodes (LEDs) EIA/JEDEC JESD51 – 50 standard //UNECE [Electronic resource]. – 2012. – Mode of access: <http://www.jedec.org/sites/default/>.

17. Implementation of the Electrical Test Method for the Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance of Light – Emitting Diodes with Exposed Cooling EIA/JEDEC JESD51-51 standard //UNECE [Electronic resource]. – 2012. – Mode of access: <http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-51.pdf>. – Date of access: 22.04.2016.

18. Guidelines for Combining CIE 127 – 2007 Total Flux Measurements with Thermal Measurements of LEDs with Exposed Cooling Surface EIA/JEDEC JESD51 – 52 standard //UNECE [Electronic resource]. – 2012. – Mode of access: <http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51 – 52.pdf>. – Date of access: 22.04.2016.

19. Terms, Definitions and Units Glossary for LED Thermal Testing EIA/JEDEC JESD51-53 standard //UNECE [Electronic resource]. – 2012. – Mode of access: <http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-53.pdf>. – Date of access: 22.04.2016.

20. Патент US 2008/0205482 A1 / D. Cao, Z. – H. Lin. Method and testing equipment for LEDs and Laser diodes; опубл. 23.02.2007. Бюл. № 11/678, 243.

21. Kuball M. Self – Heating effects at high Pump Currents in Deep UV LED /M. Kuball, S. Pajasingam, A. Sarua et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 124.

22. Winewisser C. In – situ temperature measurements via ruby R – lines of sapphire substrate based InGaN light emitting diodes during operation / C. Winewisser, J. Schneider // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89. – P. 3091.