

## Закономерности и особенности токовых зависимостей теплового сопротивления переход-корпус мощных InGaN/GaN светодиодов

В.А. Сергеев,\* В.И. Смирнов, И.В. Фролов, А.М. Ходаков

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН  
Россия, 432071, Ульяновск, Гончарова, д. 48/2

(Статья поступила 19.09.2013; Подписана в печать 04.04.2014)

На основе измерения тепловых характеристик 30 образцов произведенных фирмой Cree мощных InGaN/GaN светоизлучающих диодов (СИД) в диапазоне рабочего тока 50–550 мА показано, что для всех светодиодов тепловое сопротивление переход-корпус  $R_{T_j-c}$  возрастает с увеличением рабочего тока. Установлено, что крутизна зависимости  $R_{T_j-c}$  от тока значительно уменьшается для токов более чем 300 мА. Рассчитаны выборочные средние значения параметров токовых зависимостей  $R_{T_j-c}$ . Полученные результаты подтверждают адекватность ранних предлагаемых нелинейных тепловых моделей мощного СИД и могут быть использованы для оценки неоднородности распределения температуры и плотности тока по структуре светодиода.

PACS: 81.05.Ea, 85.60.Jb, 44.10.+i

УДК: 621.382.088, 536.212

Ключевые слова: мощный светодиод, квантовая эффективность, тепловое сопротивление, тепловой импеданс.

Стремление к повышению светового потока светоизлучающего диода (СИД) приводит к увеличению прямого тока через кристалл полупроводника, что в свою очередь ведет к увеличению тепловыделения светодиодной структурой. Примерно 65-85 % потребляемой современным светодиодом электрической мощности преобразуется в тепло [1]. Основные параметры СИД в значительной мере зависят от температуры  $p$ - $n$  перехода  $R_{T_j-c}$ . По величине и степени разброса теплового сопротивления  $p$ - $n$  переход-корпус СИД можно судить о качестве изделия данного типа. Температурная зависимость плотности рассеиваемой структурой мощности вызвана действием различных механизмов положительной тепловой обратной связи (ПТОС), по этой причине зависимости максимальной и средней температуры  $p$ - $n$  перехода от электрической мощности становятся нелинейными и тепловое сопротивление переход-корпус прибора нелинейно растет с увеличением электрической мощности [2].

Важной особенностью гетеропереходных СИД является то, что наряду с температурной зависимостью плотности тока светодиода и теплофизических характеристик элементов его структуры, происходит сильное уменьшение квантовой эффективности СИД с ростом температуры и плотности тока [3]. В результате этого процесса величина рассеиваемой структурой тепловой мощности растет, что по существу приводит к дополнительной положительной электротепловой обратной связи. Поэтому уравнение ПТОС для структуры СИД будет следующим

$$q(J, T_{ar}) = U_D J = U_D J_0 [1 - \eta(J, T_{ar})] \times \exp\left(-\frac{E_g - e(U_D - r S_{ar} J(T_{ar}))}{m k_B T_{ar}}\right), \quad (1)$$

где  $q(x, y)$  — плотность тепловой мощности, выделяемой структурой светодиода,  $J_0$  — слабо зависящий от температуры параметр,  $U_D$  — прямое падение напряжения на СИД,  $J$  — плотность прямого тока через СИД,  $E_g$  — ширина запрещенной зоны полупроводника,  $T_{ar}$ ,  $S_{ar}$  — температура и площадь активной области структуры СИД соответственно,  $r$  — сопротивление гетероструктуры,  $m$  — параметр, зависящий от механизма токопереноса в гетеропереходе,  $k_B$  — постоянная Больцмана.

Согласно представленным в работах [4–6] исследованиям, зависимость квантовой эффективности светодиодов от параметров режима их работы  $\eta(J, T)$  можно аппроксимировать следующей функцией:

$$\eta(T, J) = \eta_0(T_0, J_0) \exp(-A \Delta T - B \Delta J), \quad (2)$$

где  $\Delta T$ ,  $\Delta J$  — отклонения температуры и плотности тока активной области от начальных значений  $T_0$  и  $J_0$ . Параметры  $A$ ,  $B$  и  $\eta_0$  определяются по экспериментальным данным.

В работах [7, 8] рассмотрена нелинейная тепловая модель мощного светоизлучающего диода с InGaN/GaN гетероструктурой на сапфировой подложке с одновременным учетом температурной зависимости плотности тока и зависимости внутренней квантовой эффективности гетероструктуры от температуры и плотности тока. С целью определения распределений тока и температуры по многослойной структуре СИД решалось стационарное уравнение теплопроводности

$$\operatorname{div}(\lambda_i(T_{li}) \operatorname{grad} T_i) = 0, \quad (3)$$

где  $T_i = (T_{li} - T_0)$ ;  $T_{li}$ ,  $T_0$  — температуры  $i$ -го слоя конструкции и окружающей среды,  $\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя, с адиабатным граничным условием на боковых поверхностях многослойной структуры и температурой нижней поверхности структуры равной температуре окружающей среды.

\*E-mail: ufire@mv.ru

В качестве ограничения, отражающего внешнее условие включения полупроводникового прибора в электрическую цепь, рассматривалось условие постоянства протекающего через СИД полного тока

$$I = \iint_{S_{ar}} J(T_{ar}(x, y)) dx dy = \text{const}. \quad (4)$$

Граничное условие на рабочей поверхности (активная область) структуры имело вид

$$\lambda(T_{11}) \left. \frac{\partial T_1}{\partial z} \right|_{z=0} = -q(J, T_{ar}). \quad (5)$$

Зависимость функции плотности теплового потока от температуры для модели [7] определялась в приближении локальной тепловой обратной связи [9].

$$q = q_{av} [1 + \xi_T(T_{ar} - T_{av})/T_{av}], \quad (6)$$

$\xi_T$  — температурный коэффициент плотности тока при условии (4),  $q_{av}$  — средняя плотность тепловой мощности,  $T_{av}$  — средняя температура активной области структуры. Для модели [8] решалось уравнение (1) относительно плотности тока  $J$ . В результате решения задачи (3–5) были рассчитаны зависимости величины теплового сопротивления структуры  $R_{Tj-c}$  от прямого тока  $I$  СИД для различных сочетаний функциональных зависимостей  $\eta(J, T)$  и  $\lambda(T)$  и получено, что в результате действия указанных выше ПТОС наблюдается рост величины теплового сопротивления СИД на (15–20)% при увеличении силы тока  $I$  в пять раз (рис. 1).

Апробация предложенной модели проводилась путем сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей теплового сопротивления структуры серийных мощных СИД типа XRC-RED-L1-R2-M2-C-1 фирмы CREE от полного тока. Полупроводниковая структура СИД этого типа представляет собой полупроводниковый кристалл с гетероструктурой InGaN/GaN на подложке из карбида кремния SiC. Геометрические параметры структуры составляли:  $L_x = L_y = 680$  мкм,  $S_{ar} = 640 \times 640$  мкм<sup>2</sup>,  $L_z = 100$  мкм [10]. Начальная температура  $T_0 = 300$  К. Результаты измерений и расчета по предложенной модели показаны на рис. 2.

Видно, что между экспериментальными и расчетными зависимостями  $R_{Tj-c}(I)$  наблюдается вполне удовлетворительное соответствие. Некоторое различие экспериментальных и расчетных зависимостей вызвано неточностью определения геометрических и теплофизических характеристик структуры реальных СИД. Крутизна токовой зависимости  $R_{Tj-c}(I)$  может быть использована для оценки токовой и температурной зависимости эффективности СИД и неоднородности распределения плотности тока и температуры в структуре.

Для исследования зависимостей тепловых параметров (ТП) СИД от параметров режима и внешних факторов использовались разработанные авторами оригинальные средства определения ТП по частотным зависимостям модуля и фазы теплового импеданса [11, 12],

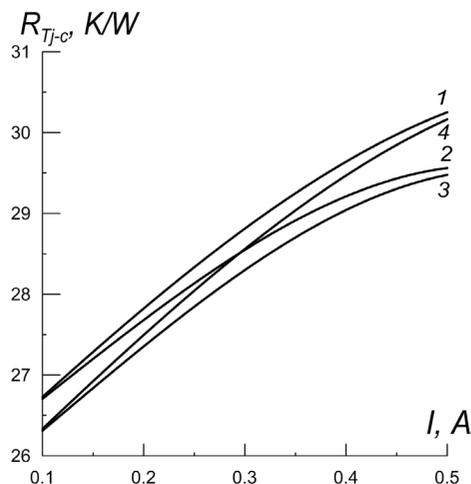


Рис. 1: Зависимости теплового сопротивления СИД от параметров модели: 1 —  $\lambda(T)$ ,  $\eta = 0$ ; 2 —  $\lambda = 40.0$  Вт м<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup>,  $\eta = 0$ ; 3 —  $\lambda = 40.0$  Вт м<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup>,  $\eta = \eta(J, T)$ ; 4 —  $\lambda(T)$ ,  $\eta = \eta(J, T)$

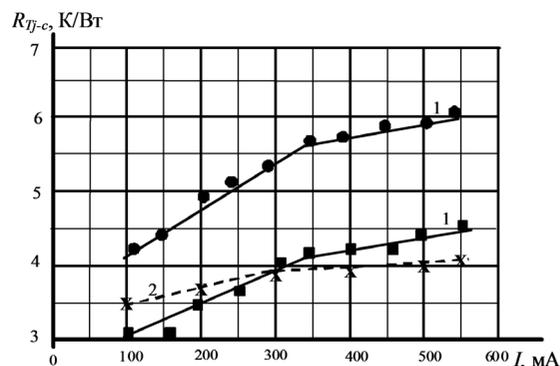


Рис. 2: Токовая зависимость теплового сопротивления мощного СИД: 1 — эксперимент, 2 — модель

измеренным с применением широтно-импульсной модуляции электрической греющей мощности по гармоническому закону, которые по чувствительности и точности не уступают зарубежным аналогам. На экспериментальных зависимостях модуля теплового импеданса  $|Z_T(\Omega)|$  СИД XRC-RED-L1-R2-M2-C-1 от частоты модуляции греющей мощности (рис. 3а) наблюдаются три участка медленного и два участка быстрого спада; на частотных зависимостях фазы теплового импеданса (рис. 3б) пологим участкам соответствуют минимумы, а участкам быстрого спада — максимумы.

Конструкция исследованных СИД, размещенных на теплоотводящей алюминиевой пластине, показана на рис. 4. Основание корпуса СИД семейства XRC представляет собой металлизированную керамическую пластину (КП) нитрида алюминия. Кристалл окружен металлическим отражателем и сверху закрыт «плавающей» линзой. В такой конструкции тепловой поток от гетероперехода к теплоотводящей пластине можно считать одномерным и выделить три характерных слоя:

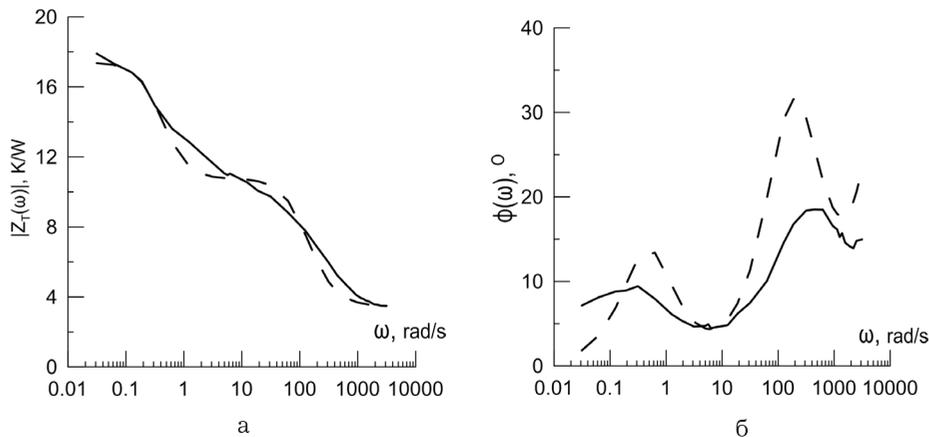


Рис. 3: Частотные зависимости модуля (а) и фазы (б) теплового импеданса мощного СИД типа XRC-RED-L1-R2-M2-C-1 на алюминиевой пластине при токе 200 мА

слой 1 — гетеропереход—верхняя поверхность КП; слой 2 — верхняя поверхность КП—поверхность теплоотвода (точка пайки); слой 3 — точка пайки—теплоотвод.

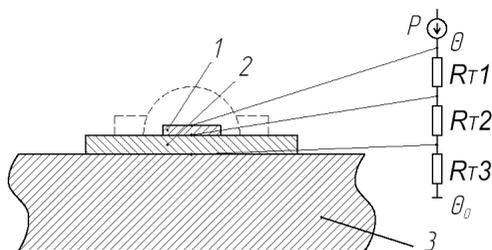


Рис. 4: Конструкция мощного СИД XRC-RED-L1-R2-M2-C-1 на алюминиевой пластине: 1 — кристалл, 2 — монтажная пластина, 3 — алюминиевая пластина

Тепловое сопротивление  $R_{Tj-c}$  и тепловая постоянная времени  $\tau_{Ti}$   $i$ -го звена  $n$ -звенной тепловой схемы СИД находятся путем решения системы  $2n$  уравнений для модуля и фазы теплового импеданса, измеренных на  $n$  частотах  $\Omega_j$ :

$$|Z_T(\Omega_j)| = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti}}{1 + \Omega_j^2 \tau_{Ti}^2}\right)^2 + \Omega_j^2 \left(\sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti} \tau_{Ti}}{1 + \Omega_j^2 \tau_{Ti}^2}\right)^2}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_T(\Omega_j) &= \frac{\operatorname{Im} Z_T}{\operatorname{Re} Z_T} = \\ &= \Omega_j \sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti} \tau_{Ti}}{1 + \Omega_j^2 \tau_{Ti}^2} \Big/ \sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti}}{1 + \Omega_j^2 \tau_{Ti}^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

По экспериментальным зависимостям были составлены системы уравнений (7, 8) и рассчитаны ТП 3-х

звенной тепловой схемы СИД и, далее по этим параметрам построены расчетные частотные зависимости модуля и фазы теплового импеданса (штриховые линии на рис. 3). Наибольшее отличие (порядка 10%) расчетных характеристик от экспериментальных наблюдается на участках быстрого изменения  $|Z_T(\Omega)|$ , что свидетельствует о некотором отклонении теплового потока от одномерного. Согласно тепловой схеме значение модуля теплового импеданса на частоте 1 Гц соответствует тепловому сопротивлению переход-корпус  $R_{Tj-c}$  данного типа СИД.

Токовые зависимости  $R_{Tj-c}$  измерялись на выборке из 30 штук СИД в диапазоне токов от 50 до 550 мА. Характерный вид зависимости  $R_{Tj-c}(I)$  мощных СИД приведен на рис. 5.

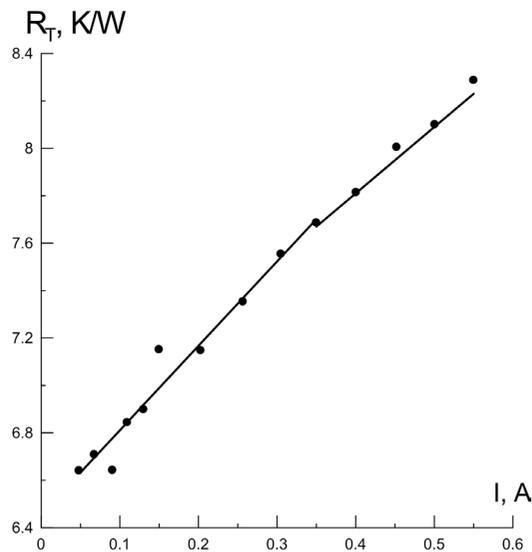


Рис. 5: Токовая зависимость теплового сопротивления переход-корпус мощных СИД типа XRC-RED-L1-R2-M2-C-1

Из рисунка видно, что крутизна зависимости

Таблица I: Средние значения и среднеквадратические отклонения средних значений параметров зависимостей  $R_{T_{j-c}}(I)$ 

$R_{T_{j-c}}$ К/Вт	СКО $R_{T_{j-c}}$ К/Вт	Крутизна К1 К/Вт·А	СКО К1 К/Вт·А	Отношение К1/К2	СКО К1/К2
7,2	1,5	2,9	0,4	0,83	0,12

$R_{T_{j-c}}(I)$  заметно уменьшается при токах больше 300 мА, что отмечалось и в [8]. По экспериментальным данным рассчитывались крутизна  $K1$  зависимости  $R_{T_{j-c}}(I)$  на участке 50–350 мА, крутизна  $K2$  на участке 350–550 мА и их отношение. Выборочные средние значения и среднеквадратические отклонения средних значений параметров токовых зависимостей приведены в таблице 1.

Приведенные результаты подтверждают адекватность развитых нелинейных тепловых моделей гете-

ропереходных СИД и токовые зависимости  $R_{T_{j-c}}(I)$  и могут быть использованы для контроля однородности распределения температуры и плотности тока в структурах гетеропереходных СИД.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.132.21.1708 «Разработка неразрушающих методов и средств контроля качества гетеропереходных светоизлучающих диодов по шумовым характеристикам».

- |  |   |
|--|---|
| <p>[1] <i>Винокуров А. К.</i> Компоненты и технологии. № 5. С. 20. (2006).</p> <p>[2] <i>Marani R.</i> The Open Electrical &amp; Electronic Engineering Journal. N 4. P. 32. (2010).</p> <p>[3] <i>Шуберт Ф.</i> Светодиоды. (М.: Физматлит., 2008).</p> <p>[4] <i>Ефремов А. А., Бочкарёва Н. И., Горбунов Р. И.</i> Физика и техника полупроводников. <b>40</b>. Вып. 5. С. 621. (2006).</p> <p>[5] <i>Porre A., Lasance J. V.</i> Proc. 14th THERMINIC, Rome, Italy. P. 213. (2008).</p> <p>[6] <i>Kim A. Y., Gotz W., Steigerwald D. A.</i> Phys. Status Solidi A. <b>188</b>. N 1. P. 15. (2001).</p> <p>[7] <i>Sergeev V. A., Hodakov A. M.</i> III Nanotechnology</p> | <p>International Forum, Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. P. 291. (2011).</p> <p>[8] <i>Сергеев В. А., Ходаков А. М.</i> Физика и техника полупроводников. <b>46</b>. Вып. 5. С. 691. (2012).</p> <p>[9] <i>Сергеев В. А.</i> Известия вузов. Электроника. № 3. С. 22. (2005).</p> <p>[10] Cree XLamp XR-C LED Data Sheet www.cree.com.</p> <p>[11] <i>Смирнов В. И., Сергеев В. А. и др.</i> ПТЭ. № 1. С. 135. (2013).</p> <p>[12] <i>Сергеев В. А., Смирнов В. И. и др.</i> Известия вузов. Электроника. № 3. С. 64. (2012).</p> |
|--|---|

## Regularities and features of current dependences of junction-case thermal resistance of InGaN/GaN power light-emitting diodes

V. A. Sergeev<sup>a</sup>, V. I. Smirnov, I. V. Frolov, A. M. Hodakov

*Ulyanovsk branch of the Institution of Russian academy of sciences Kotel'nikov Institute of Engineering and Electronics of RAS.*

*Ulyanovsk, 432071, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>ufire@mv.ru*

On the basis of measurement of thermal characteristics on 30 samples of power InGaN/GaN light emitting diodes (LED) of Cree production of in the range of current 50–550 mA it is shown that thermal resistance junction-case  $R_{T_{j-c}}$  of all LEDs increases with increase of working current. It is established that the steepness of current dependence of  $R_{T_{j-c}}$  considerably decreases at currents more than 300 mA. Selective parameters of  $R_{T_{j-c}}$  current dependencies are calculated. The received results confirm adequacy of early offered nonlinear thermal models of power LED and can use for an estimating of heterogeneity of distribution of temperature and current density in LED's structures.

PACS: 81.05.Ea, 85.60.Jb, 44.10.+i

Keywords: power light-emitting diode, quantum efficiency, thermal resistance, thermal impedance.

Received 19.09.2013.

### Сведения об авторах

- Сергеев Вячеслав Андреевич, докт. техн. наук, доцент, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН; тел.: (422) 44-29-96, e-mail: sva@ulstu.ru.

2. Смирнов Виталий Иванович, докт. техн. наук, профессор, преподаватель Ульяновского государственного технического университета; тел.: (422) 77-81-01, e-mail: svi@ulstu.ru.
3. Фролов Илья Владимирович, аспирант Ульяновского государственного технического университета; тел.: (422) 44-02-13, e-mail: ilya-frolov88@mail.ru.
4. Ходаков Александр Михайлович, канд. физ.-мат.наук, старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН; тел.: (422) 44-02-13, e-mail: ln23al@yandex.ru.