

Теплоэлектрическая модель InGaN/GaN светодиода с учетом влияния подложки гетероструктуры

В.А. Сергеев^{1,2}, А.М. Ходаков¹

¹Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск, Россия

²Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

sva@ulstu.ru

Важным фактором, определяющим функциональные свойства, предельные режимы работы и надежность гетеропереходных светоизлучающих диодов с высокоомной подложкой, является учет тепловыделения в ней.

Представлена нелинейная теплоэлектрическая модель InGaN/GaN светодиода, учитывающая выделение джоулева тепла в подложке полупроводниковой структуры. Получено распределение потенциала по элементам структуры и токовая зависимость теплового сопротивления полупроводниковой структуры прибора. Адекватность модели подтверждена путем сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей теплового сопротивления структуры мощного светодиода от полного тока.

Представленная теплоэлектрическая модель светоизлучающего диода с учетом выделения джоулева тепла позволяет более точно рассчитывать его тепловое сопротивление. Адекватность развитой модели подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: джоулево тепло; температура; тепловое сопротивление; гетероструктура.

Для цитирования: Сергеев В.А., Ходаков А.М. Теплоэлектрическая модель InGaN/GaN светодиода с учетом влияния подложки гетероструктуры // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 6. – С. 589–595. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-6-589-595

Thermoelectric Model of InGaN/GaN LEDs Taking into Account Influence of Heterostructure Substrate

V.A. Sergeev^{1,2}, A.M. Hodakov¹

¹*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Ulyanovsk branch), Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia*

²*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

sva@ulstu.ru

The important factor, determining the functional properties, the limiting modes of operation and reliability of hetero-transient LEDs with the high-Ohm substrate is an account of heat release in it.

A nonlinear thermoelectric model of InGaN/LED, taking into account the Joule heat release in the semiconductor substrate has been presented. The distribution of the potential on the elements of the structure and the current dependence of the thermal resistance of the semiconductor device structure have been obtained. The model adequacy has been confirmed by comparison of the calculated and experimental dependences of the thermal resistance of the powerful LED structure on the total current.

The presented heat-electric model of LED diode accounting the Joule heat release permits to calculate its thermal resistance. The adequacy of the developed model has been experimentally verified.

Keywords: Joule heat; temperature; thermal resistance; heterostructure.

For citation: Sergeev V.A., Hodakov A.M. Thermoelectric model of InGaN/GaN LEDs taking into account influence of heterostructure substrate // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 6. – P. 589–595. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-6-589-595

Введение. Теплоэлектрические процессы в гетероструктурах светоизлучающих диодов (СИД) являются важным фактором, определяющим их функциональные свойства, предельные режимы работы и надежность. Современные мощные СИД работают при большой плотности тока, и, несмотря на высокую внутреннюю квантовую эффективность η , значительная часть электрической мощности выделяется в виде тепла. В гетеропереходных СИД основная часть инжектированных носителей заряда рекомбинирует в тонком слое области пространственного заряда (ОПЗ). При этом с выделением тепла рекомбинирует порядка $(1 - \eta)$ от общего числа инжектированных носителей. Поскольку толщина и глубина залегания активной области гетероструктуры мала по сравнению с толщиной кристалла, при построении теплоэлектрических моделей обычно полагают, что все источники тепла расположены на верхней поверхности кристалла СИД [1–4]. В этом случае уравнение теплопроводности решается с поверхностной плотностью тепловой мощности. Такое приближение используется при анализе тепловых процессов для большинства планарных полупроводниковых приборов.

Отметим, что квантовая эффективность η зависит от плотности тока и температуры гетероперехода, поэтому мощность источников тепла, сосредоточенных в ОПЗ, будет зависеть от полного тока. Модель с однородно распределенными поверхностными источниками тепла дает завышенное значение максимальной и средней температуры и,

соответственно, теплового сопротивления прибора по сравнению с моделью с объемными источниками тепла. Для гетеропереходных СИД с высокоомной подложкой становится существенным учет выделения джоулева тепла в подложке.

Тепловая модель СИД с учетом тепловыделения в подложке в однородном приближении источников тепла. В работе [5] рассмотрена аналитическая теплоэлектрическая модель светодиода, согласно которой выделяющаяся в структуре полная мощность представлена в виде

$$P = P_{p-n} + P_{sub}, \quad (1)$$

где $P_{p-n} = (1 - \eta)I_D U_{p-n}$ – мощность поверхностных источников тепла; I_D – полный прямой ток через светодиод; U_{p-n} – прямое падение напряжения на светодиоде; $P_{sub} = U_{sub} I_D = r_{sub} I_D^2$ – мощность объемных источников тепла, равномерно распределенных (однородное приближение) в подложке; r_{sub} – омическое сопротивление подложки.

В качестве параметра модели выбрано отношение $K_U = \frac{U_{sub}}{U_{p-n}}$. Полученные резуль-

таты расчета по этой модели показали, что с увеличением полного прямого тока через светодиод тепловое сопротивление структуры уменьшается (рис. 1).

Нелинейная распределенная теплоэлектрическая модель светодиода. При больших токах в результате действия механизмов положительной тепловой обратной связи (ПТОС) распределение температуры и плотности тока по поверхности гетероструктуры СИД становится существенно неоднородным и однородное приближение перестает адекватно описывать тепловые процессы в структуре.

Для оценки влияния эффектов неоднородного токораспределения и тепловыделения в подложке СИД рассмотрим структуру СИД в виде трехслойной системы (рис.2). Каждый слой структуры характеризуется теплофизическими и электрофизическими параметрами – теплопроводностью λ_i , плотностью ρ_i , теплоемкостью c_i , электропрово-

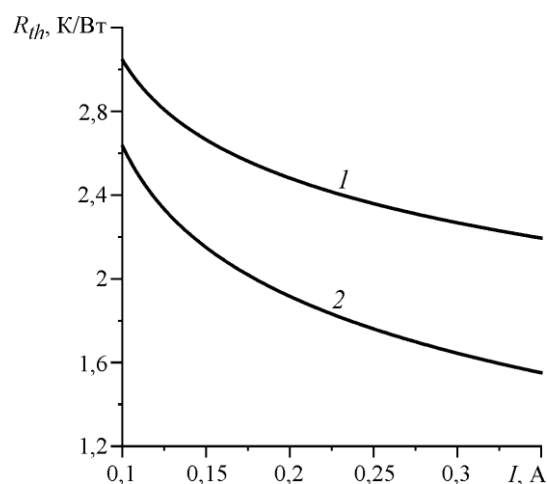


Рис.1. Токсовая зависимость теплового сопротивления структуры в однородном приближении [5]:
1 – $K_U = 0,2$; 2 – $K_U = 0,4$

Fig.1. Current dependence of the thermal resistance of the structure in the homogeneous approximation [5]:
1 – $K_U = 0,2$; 2 – $K_U = 0,4$

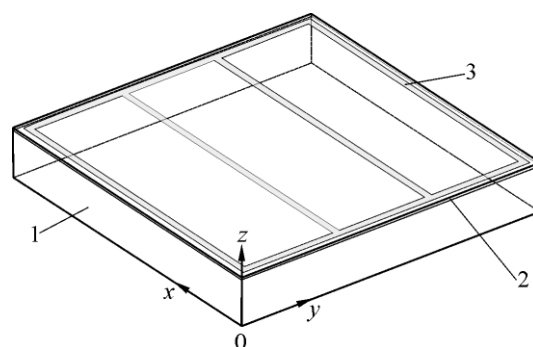


Рис.2. Геометрия моделируемой структуры СИД:
1 – подложка ($a \times d \times d_1$); 2 – гетероструктура ($a \times d \times d_2$); 3 – токоведущая металлизация
Fig.2. Geometry of the modeled LED structure:
1 – substrate ($a \times d \times d_1$); 2 – heterostructure ($a \times d \times d_2$); 3 – current-carrying metallization

димостью σ_i ($i = 1, 2, 3$). Для каждого слоя объемная плотность мощности источников тепла определяется как

$$Q_i(T) = I_{w_i}(T)V(T),$$

где V – электрический потенциал; $I_{w_i} = I_D / w_i$ – объемная плотность рабочего тока I ; w_i – объем i -го слоя.

Распределение потенциала определяется из уравнения электропроводности:

$$-\nabla(\sigma_i(T)\nabla V) = I_{w_i}. \quad (2)$$

Здесь $\sigma_i(T) = \sigma_i(T_0)(1 + \alpha_i(T - T_0))^{-1}$ – проводимость i -го слоя структуры; α_i – температурный коэффициент сопротивления; T_0 – начальная температура структуры, равная температуре теплоотвода.

Распределение температуры, в свою очередь, определяется из решения уравнения теплопроводности:

$$-\nabla(\lambda_i(T)\nabla T) = Q_i(T), \quad (3)$$

где $\lambda_i(T)$ – коэффициент теплопроводности i -го слоя, в общем случае зависящий от температуры.

Потенциал нижней поверхности структуры прибора равен нулю, а верхней поверхности металлизации определяется как

$$V(x, y, d) = U_{p-n}, \quad (4)$$

где $d = d_1 + d_2$ – толщина структуры.

Значение U_{p-n} находим из ВАХ прибора. Остальные поверхности структуры СИД электроизолированы.

Все поверхности структуры СИД теплоизолированы, кроме нижней, на которой задается условие

$$\lambda_1(T) T_z(x, y, 0) + h_{sp}(T(x, y, 0) - T_0) = 0. \quad (5)$$

Здесь $h_{sp} = 1/(a^2 R_{sp})$; $R_{sp} = (a \pi^{1/2} \lambda_{sp})$ – тепловое сопротивление растекания контакта подложка – корпус прибора [6]; λ_{sp} – теплопроводность корпуса СИД; a – линейный размер в плоскости (x, y) 1-го и 2-го элементов структуры.

В процессе проведения расчетных исследований для конкретного типа светодиода с целью сопоставления с экспериментальными данными эффективный коэффициент теплообмена h_{sp} корректировался с учетом опытной величины полного перегрева структуры СИД. Учет положительной обратной связи в рассматриваемой модели проводился по методике, подробно описанной в работе [5].

Решение теплоэлектрической задачи и анализ полученных результатов. Решение модельной задачи (1) – (5) находилось численным методом конечных элементов с использованием программной среды COMSOL Multiphysics. В качестве примера для численного исследования модели рассмотрена конструкция мощного InGaN/GaN СИД с кристаллом Cree EZ1000, геометрические параметры которой и ВАХ определялись согласно [7]. В качестве материала подложки выбраны Si и SiC, электрофизические и теплофизические характеристики которых и их зависимости от температуры взяты в соответствии с [8]. Согласно этим справочным данным отношение $\sigma_{SiC} / \sigma_{Si} \approx 30$ при температуре $T_0 = 300$ К.

На рис.3 представлены результаты расчетов изменения электрического потенциала по толщине полупроводниковой структуры в точке верхней поверхности, в которой достигается максимальная температура. Точки излома кривых соответствуют границам слоев структуры. На рис.4 показана токовая зависимость теплового сопротивления структуры светодиода, определяемого как

$$R_{th} = \frac{1}{SP} \iint_S \Delta T(x, y, d) dx dy,$$

где $\Delta T = T(x, y, d) - T_0$ – локальная величина перегрева в точках верхней поверхности гетероструктуры относительно корпуса; $S = a^2$; P – электрическая мощность.

Зависимости $R_{th}(I)$ без учета тепловыделения в подложке (кривые 3 и 4 на рис.4) рассчитаны в температурнезависимом приближении плотности мощности.

Апробация предложенной модели проводилась путем сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей теплового сопротивления структуры мощного светодиода Cree XREWHT [9] от полного тока. Результаты измерения теплового сопротивления структуры этого типа СИД и расчета по предложенной модели в относительных единицах (R_{th} / R_{th}^{max}) показаны на рис.5. Из рисунка видно, что между эксперименталь-

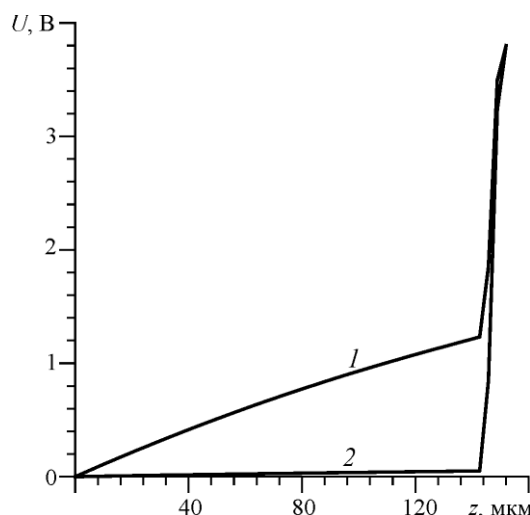


Рис.3. Изменение электрического потенциала по толщине структуры: 1 – Si; 2 – SiC; $(x, y): (3 \cdot 10^{-5}, 3 \cdot 10^{-5})$ м

Fig.3. Change in the electrical potential along the thickness of the structure; substrate: 1 – Si; 2 – SiC; $(x, y): (3 \cdot 10^{-5}, 3 \cdot 10^{-5})$ m

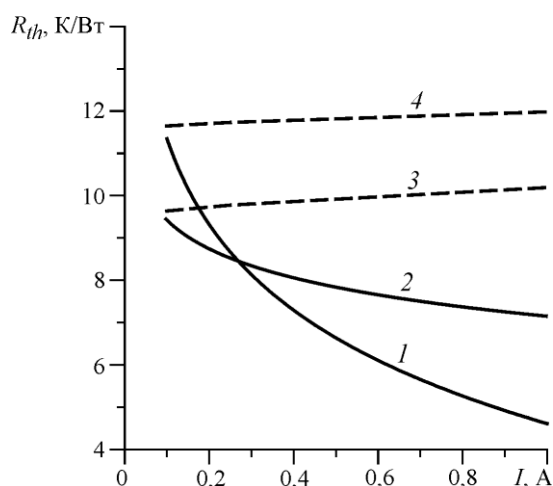


Рис.4. Тепловое сопротивление полупроводниковой структуры, рассчитанное по нелинейной модели: 1 и 4 – Si; 2 и 3 – SiC (3, 4 – без учета тепловыделения в подложке)

Fig.4. Thermal resistance of the semiconductor structure, calculated from the nonlinear model: 1 and 4 – Si; 2 and 3 – SiC

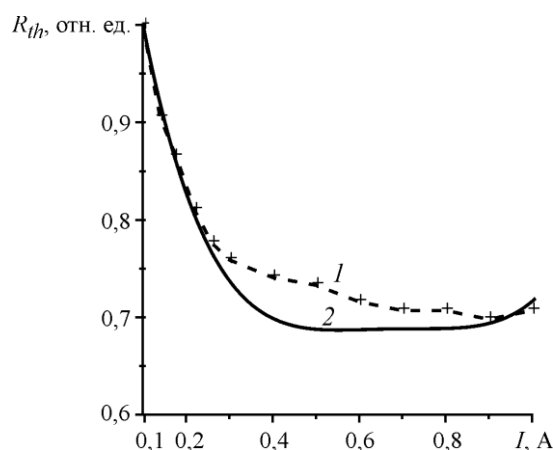


Рис.5. Токовая зависимость теплового сопротивления структуры (апробация модели): 1 – эксперимент; 2 – расчет

Fig.5. Current dependence of the thermal resistance of the structure (approximation of the model): 1 – experiment; 2 – calculation

ными и расчетными зависимостями наблюдается удовлетворительное соответствие. С ростом полного тока в структуре СИД происходят разнонаправленные процессы – рост максимальной температуры структуры из-за неоднородного тепловыделения в гетеропереходе, связанного с действием различных механизмов ПТОС в структурах прибора, и снижение полного теплового сопротивления светодиода в результате тепловыделения в подложке. Преобладание того или иного процесса проявляется в характере представленных зависимостей теплового сопротивления СИД от протекающего тока, в частности наблюдается слабая зависимость $R_{th}(I)$ для токов более 0,4 А.

Заключение. Представленная теплоэлектрическая модель СИД с учетом выделения джоулева тепла в подложке позволяет более точно рассчитывать его тепловое сопротивление. Адекватность развитой модели доказана экспериментально. Приведенные в работе расчетные и экспериментальные зависимости подтверждают сделанные ранее предположения о влиянии на характер поведения зависимости теплового сопротивления кристалла мощного СИД от светодиодного тока, конкурирующих процессов действующей в СИД положительной тепловой обратной связи и выделения джоулева тепла в подложке.

Разработанные подходы к моделированию протекающих в СИД теплоэлектрических процессов и конкретные расчетные результаты могут быть применены в целях улучшения конструкции СИД, расширения их предельных режимов работы и повышения надежности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 16-47-732151 р_офи_м.

Литература

1. Transient electrothermal simulation of power semiconductor devices / *Bin Du, J.L. Hudgins, E. Santi et al.* // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2010. – Vol. 25. – No. 1. – P. 237–248.
2. *Gachovska T.K., Du B., Hudgins J.L., Santi E.* Transient electro-thermal modeling of bipolar power semiconductor devices. – San Rafael: Morgan & Claypool, 2013. – 84 p.
3. *Сергеев В. А., Ходаков А. М.* Теплоэлектрические модели мощных биполярных полупроводниковых приборов. Ч. II. Нелинейная теплоэлектрическая модель мощных светоизлучающих диодов // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60. – №12. – С. 1254–1258.
4. *Shan O., Dai Q., Chhajed S.* Analysis of thermal properties of GaInN light-emitting diodes and laser diodes // J. of Appl. Phys. – 2010. – No. 108. – P. 30–38.
5. *Сергеев В.А., Ходаков А.М.* Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 160 с.
6. *Lee S., Song S., Au V., Moran K.* Construction/spreading resistance model for electronic packaging // Proc. of ASME/JSME Thermal Engineering Conference. – 1995. – Vol. 4P. – P. 199.
7. URL: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Chips-and-Material/Data-Sheets-Chips/CPR3EC.pdf> (дата обращения: 18.12.2016).
8. NSM archive physical properties of semiconductors.
URL: www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html (дата обращения: 18.12.2016).
9. URL: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/Data-and-Binning/XLamp7090XRE.pdf> (дата обращения: 18.12.2016).

Поступила 21.12.2016 г.; принята к публикации 12.09.2017 г.

Сергеев Вячеслав Андреевич – доктор технических наук, доцент, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д.48/2), заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульянов-

ского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32), sva@ulstu.ru

Ходаков Александр Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д.48/2), ln23al@yandex.ru

References

1. Bin Du, Hudgins J.L. Santi E. et al. Transient electrothermal simulation of power semiconductor devices. *IEEE Transactions on power electronics*, 2010, vol. 25, no 1, pp. 237–248.
2. Gachovska T.K., Du B., Hudgins J.L., Santi E. *Transient electro-thermal modeling of bipolar power semiconductor devices*. San Rafael: Morgan & Claypool, 2013. 84 p.
3. Sergeev V. A., Hodakov A. M. Teploelektricheskie modeli moshchnyh bipolyarnyh poluprovodnikovyh priborov. Chast' II. Nelinejnaya teploelektricheskaya model' moshchnyh svetoizluchayushchih diodov [Thermoelectric models of powerful bipolar semiconductor devices. Part II. Nonlinear heat-electric model of high-power light-emitting diodes]. *Radiotekhnika i elektronika. – Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015, vol. 60, no.12, pp. 1254–1258. (in Russian).
4. Shan O., Dai Q., Chhajed S. Analysis of thermal properties of GaInN light-emitting diodes and laser diodes. *Journal of applied physics*, 2010, no.108, pp. 30–38.
5. Sergeev V.A., Hodakov A.M. *Nelinejnye teplovye modeli poluprovodnikovyh priborov* [Nonlinear thermal models of semiconductor devices].Ulyanovsk, UISTU Publ., 2012. 160 p. (in Russian).
6. Lee S., Song S., Au V., Moran K. Construction/spreading resistance model for electronic packaging. *Proceedings of ASME/JSME Thermal Engineering Conference*, 1995, vol. 4P, p. 199.
7. Available at: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Chips-and-Material/Data-Sheets-Chips/CPR3EC.pdf> (accessed 18.12.2016).
8. *NSM Archive physical properties of semiconductors*. Available at: www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html (accessed 18.12.2016).
9. Available at: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/Data-and-Binning/XLamp7090XRE.pdf> (accessed 18.12.2016).

Submitted 21.12.2016; accepted 12.09.2017.

Sergeev Vyacheslav A. – Dr. Sci. (Eng.), associate professor, director of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Ulyanovsk branch), Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharova st., 48/2), head of the Radio Engineering, Opto- and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz st., 32), sva@ulstu.ru

Hodakov Aleksander M. – Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior researcher of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Ulyanovsk branch), Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharova st., 48/2), ln23al@yandex.ru