

УДК 621.382: 535.376

МЕТОД ТЕПЛОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОДИОДОВ

О.С. ВАСЬКОВ, В.К. КОНОНЕНКО*, В.С. НИСС

*Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, Минск, 220013, Беларусь***Институт физики НАН Беларуси
пр. Независимости, 70, Минск, 220072, Беларусь Поступила в редакцию 29 апреля 2011*

Изучены тепловые характеристики полупроводниковых светодиодов LUXEON Rebel белого свечения компании Philips Lumileds. Методом тепловой релаксационной спектроскопии определены компоненты теплового сопротивления светодиодов с разным качеством слоя теплового интерфейсного материала на теплоотводе. Измеренное тепловое сопротивление переход-корпус светодиодов составило 10,7–10,8 К/Вт, что коррелирует с паспортными данными (10 К/Вт). Постоянные времена теплопередачи, соответствующие компонентам теплового сопротивления этой области, находятся в интервале 0,03–12 мс.

Ключевые слова: светодиод, тепловое сопротивление, релаксационная спектроскопия.

Введение

Полупроводниковые светодиоды широко используются в промышленности, технике, а также в быту. В настоящее время наибольшее внимание уделяется разработке и улучшению выходных характеристик светодиодов белого свечения, предназначенных для использования в различных системах освещения [1].

В данной работе на основе исследования переходных процессов при саморазогреве прямым током разработан эффективный метод определения тепловых параметров диодных излучателей [2, 3]. Разработанным методом релаксационной спектроскопии из дифференциального анализа временных зависимостей температуры перегрева активной области светодиодов на основе производных третьего порядка (в рамках эквивалентных моделей Фостера и Кауера) определены компоненты теплового сопротивления светодиодов с разным качеством слоя теплового интерфейсного материала (ТИМ) на теплоотводе. Дифференциальные и дискретные спектры теплового сопротивления получены для светодиодов LXML-PWC1-0080 белого свечения, что позволяет установить тепловые параметры 10-компонентных наборов их структурных составляющих.

Методика эксперимента и структура светодиодов

Исследования проводились с помощью разработанного в БНТУ релаксационного импеданс-спектрометра тепловых процессов [4]. Измерения основаны на регистрации процесса релаксации прямого напряжения на светодиоде при подаче на исследуемый образец ступенчатого импульса тока длительностью в интервале от 10 мкс до 200 с. Из изменения прямого напряжения (с учетом предварительно определенного температурного коэффициента напряжения – К-фактора) находится температура перегрева активной области светоизлучающего прибора. Регистрация изменений напряжения осуществляется с временным разрешением 1 мкс, а максимальное количество точек регистратора достигает 16 000.

Анализ результатов измерений температуры перегрева при саморазогреве (или остывании) образца на основе представления его структуры в виде эквивалентной тепловой RC-цепи

для многослойных систем позволяет определить тепловое сопротивление диодного излучателя. Такого рода тепловые эквивалентные цепи используются для анализа и расчета температуры активной области полупроводниковых приборов в различных режимах работы, например, при SPICE-моделировании.

Температура перегрева ΔT активной области прибора определяется полным тепловым сопротивлением его элементов и межэлементных соединений между $p-n$ -переходом и окружающей средой. Исходя из аналогии описания электрических токов и тепловых потоков, переходные процессы в полупроводниковой структуре анализируются в рамках эквивалентных схем [5] в виде RC -цепочек – схем Фостера [6] и Кауера [7]. При использовании для анализа схемы Фостера временная зависимость $\Delta T(t)$ (при нагревании диода) имеет простой математический вид [2, 3, 8, 9]:

$$\Delta T(t) = P_T \sum_i^n R_i \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right). \quad (1)$$

Здесь P_T – мощность, рассеиваемая светодионом в виде тепла, R_i – тепловое сопротивление i -го структурного элемента светодиода, $\tau_i = R_i C_i$ – постоянная времени тепловой релаксации, C_i – теплоемкость элемента конструкции диода и теплоотвода, n – число компонентов в структуре. При остывании диода, очевидно, температура активной области падает согласно

$$\Delta T(t) = P_T \sum_i^n R_i \exp(-t/\tau_i).$$

В общем случае тепловое сопротивление диодной структуры определяется как $R_T = \sum_i^n R_i$, где величина n задает общее число структурных элементов светодиода. Далее анализируем переходный (релаксационный) процесс изменения температуры активной области диодного излучателя. Согласно (1) определяем динамическое тепловое сопротивление как $R_T^*(t) = \Delta T(t)/P_T$ и вводим функциональную зависимость [3]:

$$R^*(t) = \sum_i^n R_i \frac{t}{\tau_i} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_i}\right). \quad (2)$$

Как видно, в случае, когда различие постоянных времен тепловой релаксации τ_i для ближайших компонентов структуры достаточно велико, величина $R^*(t)$ при $t \approx \tau_i$ дает значения теплового сопротивления R_i для i -го компонента светодиода.

Однако график зависимости (2) для сложных многослойных структур, к которым относятся современные полупроводниковые приборы, мало информативен. Поэтому на основании (1) дифференциальная зависимость (2) преобразовывалась к функции более высокого порядка:

$$R_3^*(t) = \sum_i^n R_i \left(\frac{t}{3\tau_i} \right)^3 \exp\left(3 \left(1 - \frac{t}{3\tau_i}\right)\right). \quad (3)$$

Функция (2) соответствует дифференцированию $\Delta T(t)$ первого порядка ($R^*(t) = R_1^*(t)$), а функция (3) – третьего порядка. Переход от (2) к (3) позволяет, используя цифровые данные измерений, наиболее точно подобрать тепловые параметры структурных элементов светодиода. Легко показать, что можно представить дифференциальную функцию теплового сопротивления высшего порядка, например m -го, в виде $R_m^*(t) = \sum_i^n R_i (t/m\tau_i)^m \exp(m(1 - t/m\tau_i))$.

Такая методика дает возможность уточнить параметры компонентов R_i и τ_i .

Зависимость $R_3^*(t)$ представляет собой дифференциальный спектр теплового сопротивления. При задании достаточного большого числа n структурных компонентов светодиода можно определить также дискретный спектр теплового сопротивления. Обычно число анализируемых тепловых структурных элементов определяется мощностью

программных симуляторов или эффективностью используемых нестационарных тепловых тестеров и ограничивается $n = 3 \div 5$ (из-за технических трудностей измерений и сложности анализа) [10, 11]. Развита выше дифференциальная методика дает возможность расширить число исследуемых тепловых структурных элементов диодного излучателя до $n = 10$.

Как известно, схема Фостера носит ограниченный характер, так как содержит последовательно соединенные емкости, которые в общем случае трудно однозначно связать с реальными теплоемкостями элементов. Поэтому данная схема для получения более точных значений тепловых сопротивлений преобразовывается в схему Кауера [12, 13].

Развита методика апробирована для светодиодов разного типа и инжекционных лазеров ИК-диапазона [2, 3, 14, 15]. Ниже приведены результаты измерений для светодиодов LUXEON Rebel белого свечения компании Philips Lumileds, выполненных по тонкопленочной флип-чип (TFFC) технологии [1], при которой тонкопленочный светодиодный чип садится на подложку из DBC (direct bonded copper) керамики (рис. 1).

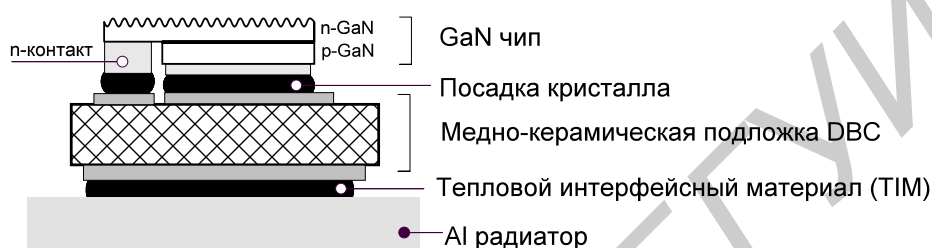


Рис. 1. Схематическая структура белого светодиода LXML-PWC1-0080 на теплоотводе

Исходные данные слоев структуры светодиодов приведены в табл. 1. Как следует из предварительных оценок, основной вклад в тепловое сопротивление светодиодов вносит медно-керамическая подложка и слой TIM. Сечение подложки Al_2O_3 принималось эффективным для учета растекания теплового потока. Немаловажное значение имеет также посадка кристалла.

Таблица 1. Теплопроводности, размеры слоев и оценка тепловых сопротивлений слоев структуры светодиода типа LXML-PWC1-0080

| Слои структуры | Толщина (мкм) | Сечение (мм) | Теплопроводность (Вт/К·см) | Тепловое сопротивление (К/Вт) |
|-------------------------------------|---------------|--------------|----------------------------|-------------------------------|
| Чип GaN | 4 | 1×1 | 1,30 | 0,03 |
| Посадка кристалла | 50 | 1×1 | 0,57 | 0,9 |
| Медное покрытие | 70 | 1×1 | 3,85 | 0,18 |
| Керамическая подложка (Al_2O_3) | 500 | 1,5×1,5 | 0,30 | 7,4 |
| Медное покрытие | 70 | 2×2 | 3,85 | 0,04 |
| Слой TIM | 50 | 2×2 | 0,03 | 4,2 |

Результаты измерений и обсуждение

Результаты исследования методом релаксационной спектроскопии тепловых параметров светодиодов LUXEON Rebel белого свечения приведены на рис. 2–4. Экспериментальные точки показывают дифференциальные спектры теплового сопротивления согласно представлению (2) и (3). Временная шкала для $R_3^*(t)$ сдвинута в соответствии с (3). Дискретные спектры теплового сопротивления в 10-компонентном наборе найдены как для схемы Фостера, так и Кауера, и привязаны к временной шкале $R_1^*(t)$. Хорошее совпадение подгоночных кривых с экспериментальными данными свидетельствует о достаточности 10-компонентного набора структурных элементов светодиодов и адекватности используемой методики.

Сравнение полученных спектров теплового сопротивления демонстрирует, что свойства области посадки и TIM-слоя (границы раздела подложка–радиатор) вносят определяющий вклад в тепловое сопротивление структуры от активной зоны светодиода до радиатора. В зависимости от прижима светодиода к радиатору тепловое сопротивление TIM-слоя может возрас-

ти почти в два–три раза (табл. 2). При этом тепловое сопротивление остальных составляющих структуры светодиода практически не изменяется. Кроме того, полученные значения R_T согласуются с предварительными оценками, приведенными в табл. 1.

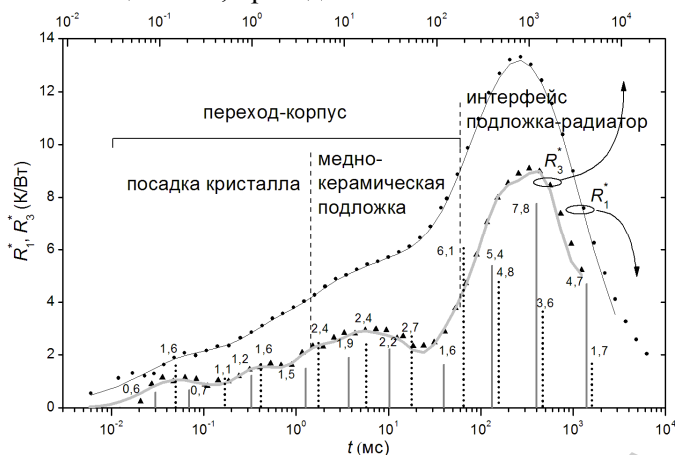


Рис. 2. Дискретный и дифференциальный спектры «тепловое сопротивление–постоянная времени тепловой релаксации» для светодиода LXML-PWC1-0080 без ТИМ-слоя в представлении 10-компонентных эквивалентных схем Фостера (—) и Кауера (••••)

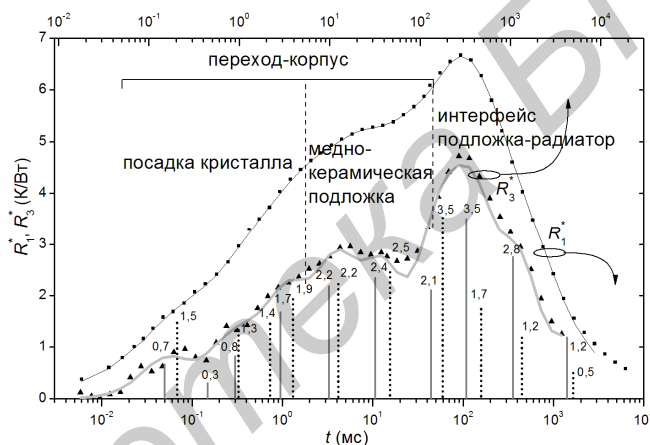


Рис. 3. Спектры «тепловое сопротивление–постоянная времени тепловой релаксации» для светодиода LXML-PWC1-0080 в представлении схем Фостера (—) и Кауера (••••) при слабом прижиме

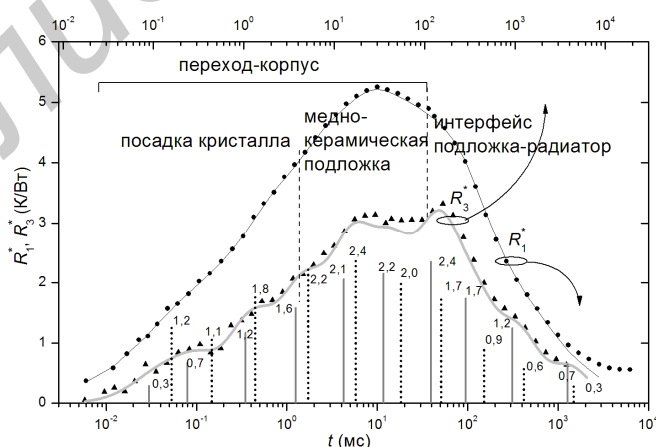


Рис. 4. Спектры «тепловое сопротивление–постоянная времени тепловой релаксации» для светодиода LXML-PWC1-0080 в представлении схем Фостера (—) и Кауера (••••) при сильном прижиме

Таблица 2. Структура теплового сопротивления светодиода, полученная из дискретных спектров на рис. 2–4 (схема Кауера)

| Структурные слои излучателя | Компоненты теплового сопротивления (К/Вт) | | | | | |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------|-----|--------------------------------|-----|-----------------|------|
| | TIM+теплоотвод (сильный прижим) | | TIM+теплоотвод (слабый прижим) | | граница без TIM | |
| Посадка кристалла | 1,2 | 4,1 | 1,5 | 4,2 | 1,6 | 4,3 |
| | 1,1 | | 1,3 | | 1,1 | |
| | 1,8 | | 1,4 | | 1,6 | |
| Медно-керамическая подложка | 2,2 | 6,6 | 1,9 | 6,6 | 2,4 | 7,5 |
| | 2,4 | | 2,2 | | 2,4 | |
| | 2,0 | | 2,5 | | 2,7 | |
| TIM-слой (граница раздела подложка–радиатор) | 1,7 | 3,5 | 3,5 | 6,9 | 6,1 | 16,2 |
| | 0,9 | | 1,7 | | 4,8 | |
| | 0,6 | | 1,2 | | 3,6 | |
| | 0,3 | | 0,5 | | 1,7 | |

Заключение

Развитым методом тепловой релаксационной спектроскопии (в рамках 10-компонентных эквивалентных схем Фостера и Кауера) определены компоненты теплового сопротивления промышленных светодиодов белого свечения в зависимости от качества TIM-слоя на теплоотводе. Измеренное тепловое сопротивление переход–корпус светодиодов составило 10,7–10,8 К/Вт, что коррелирует с паспортными данными (10 К/Вт). Постоянные времени теплопередачи, соответствующие компонентам теплового сопротивления этой области, находятся в интервале 0,03–12 мс.

Предложенные методики полезны при решении технологических проблем формирования слоев посадки, подложек и переходных (пограничных) областей и слоев на теплоотводе, а также при разработке тепловых моделей и SPICE-моделировании диодных излучателей. Авторы выражают благодарность Ю.А. Бумаю, В.М. Ломако и Е.В. Луценко за полезное обсуждение результатов измерений и помощь в работе.

THERMAL RELAXATION SPECTROMETRY METHOD AND DETERMINING THE PARAMETERS OF LIGHT-EMITTING DIODES

A.S. VASKOU, V.K. KONONENKO, V.S. NISS

Abstract

Thermal characteristics of semiconductor light-emitting diodes of LUXEON Rebel type with white radiation of Philips Lumileds firm are studied. By the thermal relaxation spectrometry method, components of the light-emitting diode thermal resistance at different quality of the TIM layer on a heat sink are determined. The measured transition–case thermal resistance of the light-emitting diodes is of 10,7–10,8 K/W that correlates with passport data (10 K/W). Time constants of heat transferring corresponding to this region are in the interval of 0,03–12 ms.

Литература

1. Philips Lumileds. [Electronic resource]. Режим доступа: <http://www.philipslumileds.com>.
2. Бумай Ю.А., Васьков О.С., Доманевский Д.С. // Сб. ст. 6-й Бел.–Росс. семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». Мн., 2007. С. 108.
3. Bumai Yu.A., Vaskou A.S., Kononenko V.K. // Metrology and Measurement Systems. 2010. Vol. 17, №1. P. 39.
4. Бумай Ю.А., Васьков О.С., Кононенко В.К. и др. // Электроника инфо. 2010. №3. С. 58.
5. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 1. Л., 1981.
6. Foster R.M. // Bell Syst. Tech. J. 1924. Vol. 3. P. 259.
7. Cauer W. // Z. Angew. Math. und Mechanik. 1930. Vol. 10, №5. P. 425.

8. *Sofia J.W.* // IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technol. Part A. 1995. Vol. 18, №1. P. 39.
9. *Székely V.* // Microelectron. J. 1998. Vol. 29, №4–5. P. 257.
10. *Digele G., Lindenkreuz S., Kasper E.* // Proc. 27th European Solid-State Device Research Conf. Stuttgart, 1997. P. 463.
11. *Farkas G., Vader Q.van V., Poppe A. et al.* // IEEE Trans. Components and Packaging Technol. 2005. Vol. 28, №1. P. 45.
12. *Masana F.N.* // Microelectron. Reliability. 2001. Vol. 41, №6. P. 901.
13. *Gerstenmaier Y.C., Wachutka G.* // Microelectron. J. 2002. Vol. 33, №9. P. 719.
14. *Бумай Ю.А., Васьков О.С., Кононенко В.К. и др.* // Лазерная и оптико-электронная техника. Сб. науч. ст. Вып. 11. Мн., 2008. С. 192.
15. *Бумай Ю.А., Васьков О.С., Кононенко В.К. и др.* // Сб. ст. 7-й Бел.–Росс. семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». Мн., 2009. С. 149.

Библиотека БГУИР