

Обобщенный тепловой анализ мощных светодиодов и гетеролазеров

Ю. А. Бумай^a, О. С. Васьков^a, В. К. Кононенко^b, Е. В. Луценко^b

^a Белорусский национальный технический университет, 220013 Минск, Беларусь

^b Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 220072 Минск, Беларусь
e-mail: bumai@tut.by

Thermal analysis of light-emitting diodes (LEDs) and heterolasers is performed using electrical transient measurements. The structure of the internal thermal resistance of the devices is obtained and the thermal resistance transient function in time domain is presented. Dominant contribution of die attach layer into internal (junction to case) thermal resistance for both LEDs and heterolasers is observed.

Ключевые слова: светодиод, гетеролазер, тепловое сопротивление, температура перегрева, тепловой переходной процесс.

1. Введение

Перегрев активной области сверхярких светодиодов (LEDs) и гетеролазеров служит одним из существенных факторов, влияющих на режимы их работы, а также вызывающих деградацию излучателей. Вследствие этого, тепловые характеристики, такие, как тепловое сопротивление излучающих приборов, относятся к обязательным справочным данным при их производстве [1]. Тепловое сопротивление необходимо для анализа работы любого излучателя и содержит три основные составляющие: сопротивление “кристалл–корпус” R_{jc} , “корпус–тепlostок” R_{cs} , “тепlostок–окружающая среда” R_{sa} . Для снижения R_{jc} (внутреннего теплового сопротивления) необходимо оптимизировать размеры кристалла, способы его посадки, типы корпусов. Вместе с тем параметр R_{jc} имеет интегральный характер и в настоящее время существует потребность в детальном определении его структуры.

Один из перспективных методов получения значений тепловых сопротивлений прибора, а также элементов его структуры – измерение характеристик переходных электрических процессов, обусловленных разогревом собственным током [2–6]. Температура перегрева ΔT активной области излучающего диода определяется полным тепловым сопротивлением его элементов и межэлементных соединений между p – n –переходом и окружающей средой. Исходя из аналогии протекания тепловых и электрических процессов (одинаковом математическом виде уравнений для них), динамика отвода тепла от прибора (в частности, LEDs и гетеролазеров) в окружающую среду может быть проанализирована в рамках эквивалентной тепловой модели в виде последовательно соединенных RC -цепочек, где R – тепловые сопротивления, C – теплоемкости элементов конструкции диода и внешнего теплоотвода, а $\tau = RC$ – соответствующие тепловые постоянные времени [3, 5]. Такого рода тепловые эквивалентные RC -цепи используются для расчета температуры активной области полупроводникового прибора в различных режимах работы (например, при SPICE моделировании). К очевидным преимуществам тепловых RC -моделей относится возможность выделения элемента конструкции диода с высоким тепловым сопротивлением, что позволяет целенаправленно осуществлять поиск путей его уменьшения.

В настоящей работе на основе метода измерения электрических переходных процессов в сверхярких LEDs видимого диапазона и гетеролазерах двух типов, излучающих в ИК-области, проведен анализ структуры их тепловых сопротивлений. Это позволило установить доминирующий вклад сопротивления слоя посадки диодов.

2. Методика эксперимента

Переходные характеристики измерены с использованием 16-разрядного АЦП при подаче импульсов тока в виде ступенек с разрешением 2 мкс во временном интервале до 100 с [7]. Температура перегрева активной области светоизлучающих приборов $\Delta T(t)$ рассчитывалась из изменения прямого напряжения с учетом предварительно измеренного температурного коэффициента напряжения.

При использовании для анализа схемы Фостера [8] зависимость $\Delta T(t)$ имеет наиболее простой математический вид:

$$\Delta T(t) = P_T \sum_{i=1}^n R_i (1 - e^{-t/\tau_i}),$$

где P_T – мощность, рассеиваемая LEDs или гетеролазерами в виде тепла. Из данной формулы с использованием экспериментальной зависимости $\Delta T(t)$ и ее производных по времени вплоть до третьего порядка находилась особая зависимость $R_T^*(\tau^*)$ – релаксационный тепловой отклик элементов структуры излучателей, по экстремумам которой в рамках модели Фостера можно оценить тепловые сопротивления отдельных элементов структуры R_i и соответствующие постоянные времени тепловой релаксации $\tau_i = R_i C_i$ [5]. Схема Фостера носит формальный характер, так как содержит последовательно соединенные емкости, которые в общем случае трудно связать с реальными теплоемкостями элементов. Поэтому данная схема для получения более точных значений тепловых сопротивлений преобразовывалась в схему Кауера [8].

Исследования проводились на гетеролазерах в системе AlGaInAs–AlGaAs, излучающих на длине волны 780–820 нм (мощность генерации до 0,5–1,2 Вт в стационарном и до 2 Вт в импульсном режиме) [9]. Использованные гетеролазеры в системе GaInAsSb–AlGaAsSb излучают на длинах волн $\lambda_{st} = 2,12$ и $2,35$ мкм и имеют полосковый контакт для работы в непрерывном режиме [10]. Измерения проводились также на мощных LEDs видимого свечения, изготовленных разными фирмами.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 и 2 приведены типичные временные зависимости $R_T^*(\tau^*)$ теплового отклика элементов структуры LEDs и гетеролазеров соответственно. Особенности получения данных зависимостей для гетеролазеров ближнего ИК-диапазона (0,8 мкм), связанные с их высоким КПД, обсуждаются в работе [11].

Определенные области релаксационного теплового отклика могут быть идентифицированы с использованием сведений о размерах, теплопроводностях и теплоемкостях материалов излучателей, а слои посадки кристаллов и другие контактные слои – из-за разброса их тепловых сопротивлений при наличии нескольких приборов данного типа. Анализ более тонкой формы зависимости $R_T^*(\tau^*)$ требует разделения наблюдаемых полос, используя, например, средства подгонки.

Практически для всех исследованных диодов (как LEDs, так и гетеролазеров, см. рис. 1 и 2) в области времен 1–10 мс наблюдается доминирующий пик, соответствующий области посадки кристалла прибора на теплоотводящее основание. В табл. 1 приведены данные по определению удельного контактного теплового сопротивления (на единицу площади кристалла) LEDs и квантоворазмерных гетеролазеров обоих типов.

Из таблицы видно, что, согласно оценкам, качество слоя посадки оказывается разным (различие по тепловому сопротивлению более чем на порядок) для различных производителей LEDs. При этом не наблюдается принципиальной разницы между посадкой мощных и маломощных LEDs. Необходимо принять во внимание, что

корпусированием чипов известных фирм занимаются также вторичные производители, не всегда обеспечивающие достаточно хороший тепловой контакт, требуемый для эффективного отвода тепла.

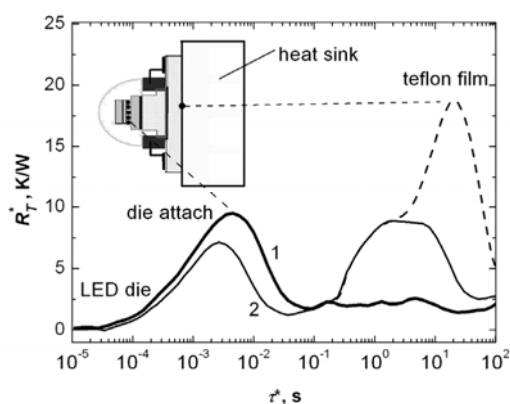


Рис. 1. Зависимости $R_T^*(\tau^*)$ для LEDs на GaN: (1) LHP2JB-LXLLB3C, (2) LXX2-PB1-POO. Для проверки между радиатором и Al PCB платой введена тефлоновая пленка.

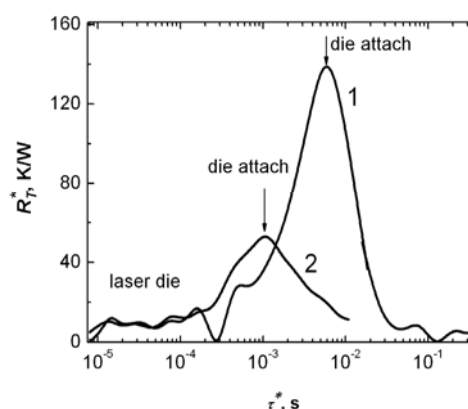


Рис. 2. Зависимости $R_T^*(\tau^*)$ для гетеролазеров в системе GaInAsSb–AlGaAsSb: (1) $\lambda_{st} = 2,35$ мкм, (2) $\lambda_{st} = 2,12$ мкм.

Отметим также, что сопротивление слоя посадки кристалла на теплоотводящее основание определяется не только теплопроводностью материала теплового интерфейса (припоя, эвтектики, пасты, клея), наличием пор полостей в нем и т. д., но и тем обстоятельством, что граница между кристаллом и слоем посадки вносит существенное тепловое сопротивление на пути теплового потока [12, 13]. Это свидетельствует о существенном рассогласовании фоновых подсистем по обе стороны от интерфейса. Природа данного эффекта на настоящий момент неизвестна и требует дальнейшего изучения [14].

Табл. 1. Тепловое сопротивление слоя посадки гетеролазеров и LEDs.

Излучатель, мощность	Диапазон излучения, цвет свечения	Удельное тепловое сопротивление слоя посадки, $\text{мм}^2 \cdot \text{K/Wt}$
гетеролазеры в системе GaInAsSb–AlGaAsSb	ИК-диапазон (2 мкм)	$\approx 7,8\text{--}21$
гетеролазеры в системе AlGaInAs–AlGaAs	ИК-диапазон (0,8 мкм)	$\approx 1,9\text{--}2,5$
LEDs Lumileds K2 (3 Вт)	синий	≈ 14
LEDs Lumileds (3 Вт)	синий	≈ 17
LEDs Lumileds (1 Вт)	0,3–0,8 мкм (белый)	≈ 9
LEDs Prolight (3 Вт)	синий	≈ 12
LEDs Epigap (маломощные)	красный	≈ 14

4. Заключение

В работе проведен обобщенный тепловой анализ квантоворазмерных гетеролазеров и LEDs. На основе метода определения переходных электрических процессов, обусловленных саморазогревом излучающего диода, обсуждаются особенности временного (релаксационного) теплового отклика элементов структуры и установлен доминирующий вклад теплового сопротивления слоя посадки кристалла во внутреннее тепловое сопротивление R_{jc} как для гетеролазеров, так и для LEDs. Удельное тепловое сопротивление слоев посадки различных гетеролазеров и LEDs составляет, согласно оценкам, порядка 2–20 мм²·К/Вт.

Благодарности

Авторы благодарят за интерес к работе и предоставление образцов А. Joullié и Р. Christol (Montpellier, France) и С.С. Поликарпова (С.-Петербург, Россия), а также Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований – за частичную поддержку исследований.

Литература

1. Guidelines for Reporting and Using Electronic Package Thermal Information. JEDEC STANDARD N51-12. 2005.
2. Hughes J.J., Gilbert D.B., Hawrylo F.Z. Measurement of the thermal resistance of packaged laser diodes. RCA Rev. 1985. Vol. 46. P. 200–213.
3. Sofia J.W. Analysis of thermal transient data with synthesized dynamics models for semiconductor devices. IEEE Trans. Component Packaging & Manufact. 1995. Vol. 18, No. 1. P. 39–47.
4. Ryabtsev G.I., Kuzmin A.N., Ges J.A., Gorban Yu.P., Soukieh M., Konyaev V.P., Stręk W. Thermal properties of high power InGaAs/AlGaAs laser diodes. J. Appl. Spectrosc. 1995. No 5. P. 121–124.
5. Бумай Ю.А., Васьков О.С., Доманевский Д.С. Тепловые процессы в сверхъярких InGaN/GaN светодиодах. Сб. ст. 6-й Бел.-Росс. семинар “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”. Мн., 2007. С. 108–112.
6. Hulet J., Kelly C. Measuring LED junction temperature. Photonics Spectra. 2008. Vol. 42, No. 7. P. 73–75.
7. Бумай Ю.А., Васьков О.С., Доманевский Д.С., Керенцев А.Ф., Кононенко В.К., Ломако В.М., Турцевич А.С. Динамический импеданс-спектрометр тепловых процессов в полупроводниковых приборах. Сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф. “Приборостроение – 2008”, Мн., 2008. С. 62–63.
8. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: в 2-х т. Л.: Энергоиздат. 1981. Т. 1.
9. Bulashevich K.A., Mymrin V.F., Karpov S.Yu., Demidov D.M., Ter-Martirosyan A.L. Effect of free-carrier absorption on performance of 808 nm AlGaAs-based high-power laser diodes. Semicond. Sci. Technol. 2007. Vol. 22, No 5. P. 502–510.
10. Joullié A., Christol P. GaSb-based mid-infrared 2–5 μm laser diodes. C. R. Physique. 2003. Vol. 4, No 6. P. 621–637.
11. Бумай Ю.А., Васьков О.С., Кононенко В.К., Ломако В.М., Парашук В.В., Поликарпов С.С. Тепловой анализ полупроводниковых лазеров в системе AlGaInAs–AlGaAs. Лазерная и оптико-электронная техника. Сб. науч. ст. Вып. 11. Мн., 2008. С. 192–199.
12. Бумай Ю.А., Васьков О.С., Ануфриев Л.П., Глухманчук В.В., Керенцев А.Ф., Турцевич А.С. Проблемы посадки кристаллов мощных кремниевых MOSFET транзисторов. II Конгресс физиков Беларуси. Сб. науч. тр. Мн., 2008. С. 97–98.
13. Бумай Ю.А., Васьков О.С., Доманевский Д.С., Манего С.А., Трофимов Ю.В. Тепловой анализ качества посадки кристаллов светодиодов. Сб. тез. докл. 6-я Всеросс. конф. “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. С.-Петербург, 2008. С. 78–79.
14. FT7-ICT integrated project “Nano Packaging Technology for Interconnect and Heat Dissipation (Nanopack)”. <http://www.nanopack.org>.