

УДК 621.382: 535.376

Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии

Нисс В.С.¹, Васьков О.С.¹, Турцевич А.С.², Керенцев А.Ф.², Кононенко В.К.³

¹Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. И.П. Казинца, 121А, 220108, г. Минск, Беларусь

³Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 5, 220064, г. Минск, Беларусь

Поступила 24.11.2014

Принята к печати 07.09.2015

Температурный режим работы электронной аппаратуры определяет надежность и стабильность оборудования. Это приводит к необходимости детального теплового анализа полупроводниковых приборов. Цель работы – оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов в пластмассовых корпусах ТО-252 и ТО-126 методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии. Тепловые постоянные элементов приборов и распределение структуры теплового сопротивления определены в виде дискретного и непрерывного спектров с использованием ранее разработанного релаксационного импеданс-спектрометра. Непрерывный спектр рассчитан на основе производных высшего порядка динамического теплового импеданса и соответствует модели Фостера, дискретный – модели Кауера. Структура теплового сопротивления образцов представлялась в виде шестизвенной электротепловой RC-модели. Анализ растекания теплового потока в исследуемых структурах проводился на основе концепции температуропроводности. Для транзисторных структур определены площадь и распределение сечения теплового потока. На основе проведенных измерений оценены тепловые параметры мощных биполярных транзисторов, в частности, структура их теплового сопротивления. Для всех измеренных образцов выявлено, что тепловое сопротивление слоя посадки кристалла вносит определяющий вклад во внутреннее тепловое сопротивление транзисторов. В переходном слое на границе полупроводник–припой тепловое сопротивление возрастает из-за изменения механизма теплопереноса. Наличие дефектов в этой области в виде отслоений припоя, пустот и трещин приводит к дополнительному росту теплового сопротивления в результате уменьшения активной площади переходного слоя. Метод тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии позволяет эффективно контролировать распределение тепловых потоков в мощных полупроводниковых приборах, что необходимо для совершенствования конструкции, повышения качества посадки кристаллов изделий силовой электроники с целью снижения их перегрева.

Ключевые слова: биполярный транзистор, тепловое сопротивление, сечение теплового потока, качество посадки, дефект припоя.

Адрес для переписки:

Васьков О.С.

Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013 г. Минск, Беларусь
e-mail: etf@bntu.by

Address for correspondence:

Vaskou A.S.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave, 65, 220013 Minsk, Belarus
e-mail: etf@bntu.by

Для цитирования:

Нисс В.С., Васьков О.С., Турцевич А.С., Керенцев А.Ф., Кононенко В.К.
Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов
методом тепловой релаксационной дифференциальной
спектроскопии
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256

For citation:

Niss V.S., Vaskou A.S., Turtsevich A.S., Kerentsev A.F., Kononenko V.K.
Estimation of thermal parameters of power bipolar transistors
by the method of thermal relaxation differential spectrometry
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 249–256

Введение

Температурный режим работы электронной аппаратуры определяет надежность и стабильность оборудования, так как перегрев кристалла полупроводниковых приборов приводит к быстрой деградации их характеристик и резкому снижению времени работы или их отказу. Эффективный отвод тепла из активной области мощных полупроводниковых приборов при непрерывном росте плотности монтажа таких изделий и существующем уровне технологии посадки кристаллов на теплоотводящее основание является сложной задачей. Это обуславливает необходимость контроля и детального анализа тепловых потоков в силовых полупроводниковых приборах, что позволяет получать информацию о структуре внутреннего теплового сопротивления контролируемого изделия, т.е. о тех участках и элементах внутренней конструкции, которые вносят наибольший вклад в его полное тепловое сопротивление.

Доминирующие позиции на рынке оборудования для анализа структуры теплового сопротивления полупроводниковых приборов занимает компания *MicRed* международного консорциума *Mentor Graphics Corporation (US)* с тепловым тестером (*Thermal transient tester*) *T3Ster*. Метод дифференциальных структурных функций, применяемый *T3Ster* для анализа сложных электротепловых цепей, признан стандартом для таких измерений. Оборудование *T3Ster* внедрено на большинстве крупнейших предприятий производителей изделий полупроводниковой электроники и используется, в частности, для оценки тепловых параметров мощных светодиодов, силовых МОП-транзисторов [1].

Метод, разработанный *MicRed*, основывается на рассчитываемых из временной релаксации динамического теплового импеданса измеряемых образцов так называемых кумулятивной и дифференциальной структурных функций. Затем из их анализа определяются эквивалентные электротепловые модели, которые, как считают разработчики *T3Ster*, соответствуют реальной физической структуре теплового сопротивления измеряемого объекта. Данный метод основан на сложных многоступенчатых преобразованиях, что приводит к накоплению систематических ошибок и, как следствие, потере точности. Основные недостатки данного метода отмечались, к примеру, в работах фирмы *IBM* [2]. Другой недостаток оборудования *T3Ster* – высокая стоимость, составляющая порядка 150 000 \$ USA за один комплект.

Цель работы – оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов в пластмассовых корпусах TO-252 и TO-126 методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии (ТРДС). Это позволит повысить качество и надежность транзисторов, снизить затраты при их производстве и испытании.

Методика измерений

Измерения теплового сопротивления транзисторов обычно основаны на контроле термозависимого параметра, в качестве которого могут быть использованы прямое напряжение перехода эмиттер–база, прямое напряжение перехода защитного диода, сопротивление открытого канала, напряжение затвор–исток. Тепловые постоянные элементов приборов и распределение структуры теплового сопротивления определены в виде дискретного и непрерывного спектров с использованием релаксационного импеданс-спектрометра [3].

Детальные исследования тепловых характеристик полупроводниковых приборов проведены методом ТРДС, хорошо зарекомендовавшим себя при анализе тепловых параметров внутренних элементов гетеролазеров, светодиодов и транзисторов [4–7]. Релаксация прямого напряжения на диоде измеряется при подаче на исследуемый образец ступенчатого импульса тока длительностью в интервале от 10 мкс до 100 с. С учетом предварительно полученного температурного коэффициента напряжения (*K*-фактора) находится температура перегрева активной области прибора. Регистрация изменений напряжения осуществляется с временным разрешением 2 мкс. При этом максимальное количество точек регистратора достигает 250 000.

Из временной зависимости температуры перехода при нагреве прямым током находятся дискретный и дифференциальный спектры теплового сопротивления R_{th} прибора, значения тепловой емкости C_{th} и постоянной времени тепловой релаксации τ . Для уточнения величины полного теплового сопротивления R_{jc} использован также метод структурных функций согласно стандарту *JESD51-14* [8].

Из анализа временной зависимости температуры активной области транзистора находится внутреннее тепловое сопротивление прибора и его структура в виде дискретного и непрерывного (дифференциального) спектра (зависимости от времени тепловой релаксации).

Анализ растекания теплового потока в исследуемых структурах проводился на основе концепции температуропроводности (тепловой эффузии). Из послонных значений компонентов теплового сопротивления R_{th} и тепловой емкости C_{th} определена активная площадь сечения теплового потока S_a транзисторных структур и профиль ее распределения [6, 7].

Структура теплового сопротивления образцов представлялась в виде шестизвенной электротепловой RC -модели. Дифференциальный спектр определяется на основе производных высшего порядка динамического теплового импеданса и соответствует модели Фостера, а дискретный – модели Кауэра. Два вида спектров (непрерывной и дискретный) теплового сопротивления используются для анализа и уточнения компонентов теплового сопротивления в рамках электротепловой модели Фостера [9] и более точной и адекватной модели Кауэра [10].

Релаксационный метод основан на анализе переходных электрических процессов, связанных

с разогревом полупроводникового прибора проходящим через него током. Временные зависимости изменения напряжения на p - n -переходе, которые дают возможность анализа путей прохождения теплового потока по элементам структуры, получают при помощи импеданс-спектрометра, схема которого показана на рисунке 1.

При помощи релаксационного спектрометра теплового сопротивления определяются следующие параметры: временная зависимость температуры активной области полупроводниковых приборов при различных значениях прямого тока; внутреннее тепловое сопротивление прибора и его структура в виде дифференциального и дискретного спектров на временной области; параметры тепловых RC -цепей для схемы Фостера; параметры тепловых RC -цепей для схемы Кауэра.

Релаксационный импеданс-спектрометр может быть использован для измерений и анализа электрических и тепловых параметров светодиодов и полупроводниковых лазеров, полевых и би-

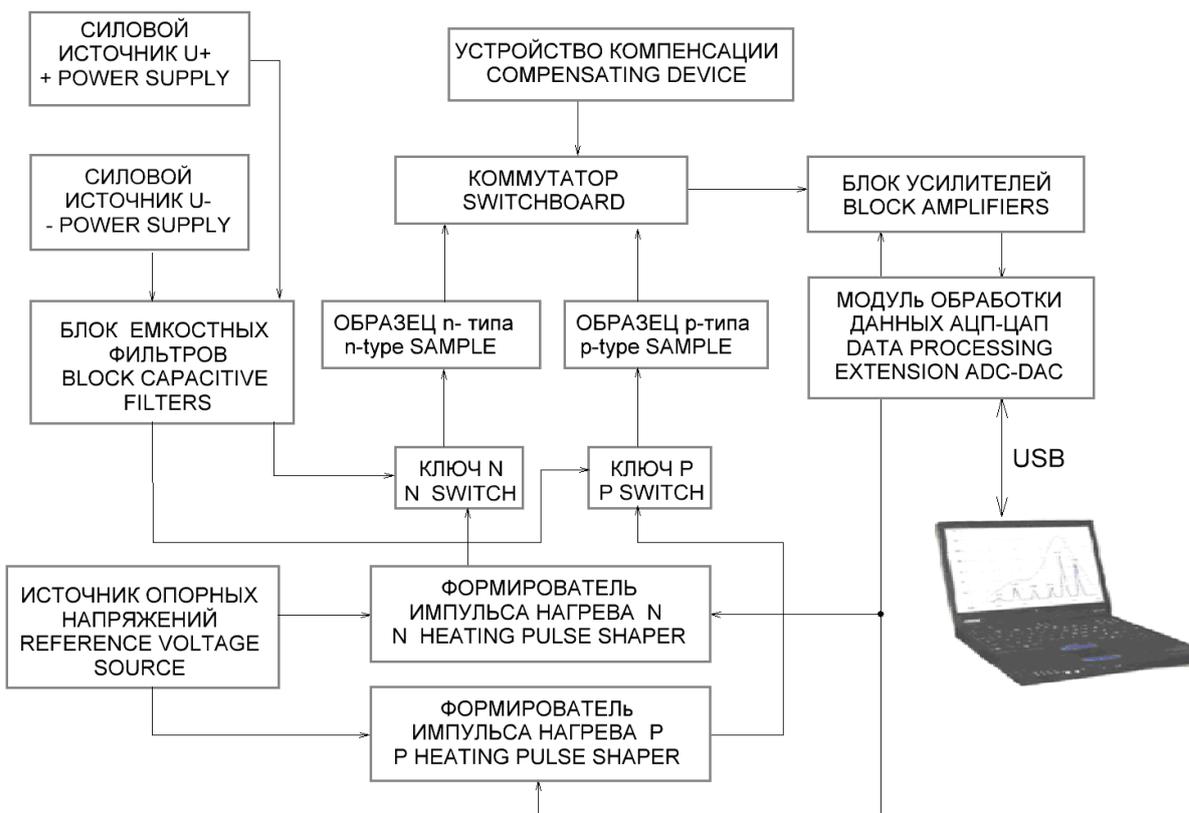


Рисунок 1 – Схема релаксационного импеданс-спектрометра для измерений и анализа электротепловых процессов в полупроводниковых приборах

Figure 1 – Diagram of relaxation impedance-spectrometer for measurements and analysis of electro thermal processes in semiconductor devices

полярных транзисторов, полупроводниковых диодов и структур на их основе.

Основу импеданс-спектрометра составляет 16-разрядный АЦП. На полупроводниковый прибор подаются импульсы тока в виде ступенек. В каждый момент времени из изменения напряжения на $p-n$ -переходе с использованием K -фактора рассчитывается температура перегрева активной области прибора. Величина K -фактора представляет собой изменение напряжения на переходе при изменении температуры на 1 К при фиксированном токе. Значения K -фактора получаются на основе анализа импульсных вольтамперных характеристик (ВАХ), при которых не допускается разогрев образца собственным током, для температурного интервала 20–85 °С. Импульсные ВАХ измеряются с использованием импульсов напряжения прямоугольной формы длительностью от 1 до 100 мкс с частотой следования 1 кГц.

Тепловые параметры транзисторов

Спектры ТРДС получены при естественном охлаждении измеряемых транзисторов в воздушном пространстве. Параметры транзисторов разных производителей приведены в таблице. Здесь геометрическая площадь кристаллов транзисторов $S_{кр}$ определена при их вскрытии, а внутреннее тепловое сопротивление (переход – корпус) приборов R_{jc} и активная площадь теплового потока S_a определяются оригинальным методом ТРДС.

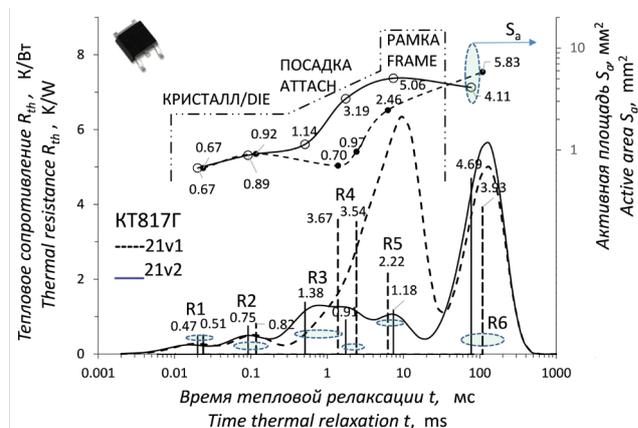
Таблица / Table

Параметры транзисторов разных производителей (R_{jc} – тепловое сопротивление переход-корпус, S_a – активная площадь сечения теплового потока, $S_{кр}$ – площадь кристалла)

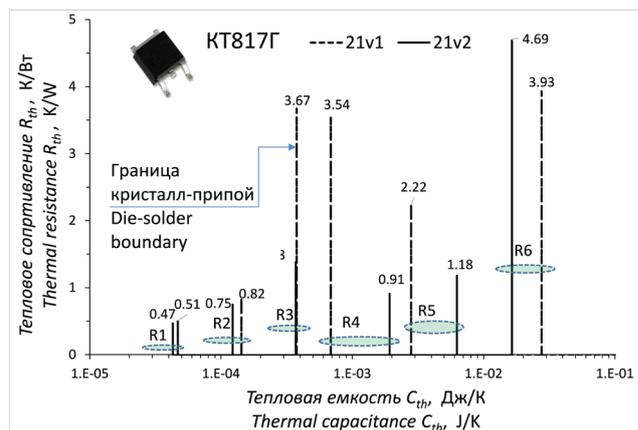
Parameters of transistors of different manufacturers (R_{jc} – thermal resistance junction-case, S_a – active square of thermal flow cross-section, $S_{кр}$ – square crystal)

Наименование Name	Тип Type	Корпус Case	R_{jc} К/Вт K/W	S_a мм ² mm ²	$S_{кр}$ мм ² mm ²
MJD44H11	n-p-n	TO252	2,7	2,35	4,20
KT817Г			4,6	1,03	2,25
2N5191		TO126	5,5	0,81	1,96
KT817А			10,4	0,64	2,25

Спектры ТРДС и сравнение транзисторов KT817Г (корпус TO252), изготовленных с разным качеством монтажа кристаллов, представлены на рисунке 2. Корпус TO-252 ограничивает рассеиваемую мощность $P < 3$ Вт при допустимой температуре перегрева кристаллов 150 °С [11].



a



b

Рисунок 2 – Дифференциальный (непрерывный) и дискретный (вертикальные линии) спектры теплового сопротивления $R_{th}(t)$ и профиль эффективной площади S_a транзисторов KT817Г 21v1 и 21v2 в корпусе TO-252 с разным качеством посадки кристаллов (a); соотношения компонентов теплового сопротивления R_{th} и тепловой емкости C_{th} (b)

Figure 2 – Differential (continuous) and discrete (vertical lines) spectra of the thermal resistance $R_{th}(t)$ and the profile of the effective area S_a of the transistors KT817G 21v1 and 21v2 in a frame TO-252 with different planting quality of crystals (a); ratio of components of the thermal resistance R_{th} and thermal capacity C_{th} (b)

На рисунке 3 представлены спектры ТРДС транзисторов KT817А (корпус TO126), показана связь послыоного теплового сопротивления R_{th} с

последней тепловой емкостью C_{th} транзисторов и изменение площади сечения S_a при распространении теплового потока.

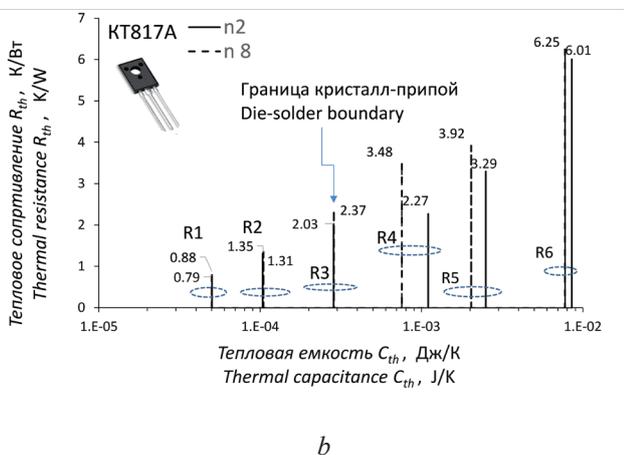
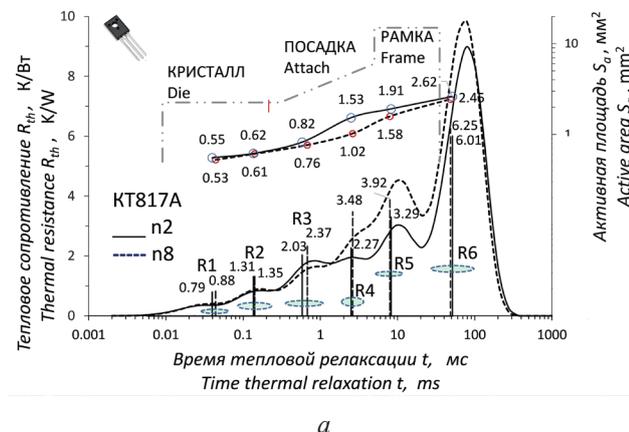


Рисунок 3 – Дифференциальный (непрерывный) и дискретный (вертикальные линии) спектры теплового сопротивления $R_{th}(t)$ и профиль площади $S_a(t)$ транзисторов KT817A n2 и n8 в корпусе ТО-126 с разным качеством посадки кристаллов (а); соотношение компонентов теплового сопротивления R_{th} и тепловой емкости C_{th} (b)

Figure 3 – Differential (continuous) and discrete (vertical lines) spectra of the thermal resistance $R_{th}(t)$ and square profile $S_a(t)$ of transistors KT817A n2 and n8 in a frame TO-126 with different planting quality of crystals (a); ratio of components of the thermal resistance R_{th} and thermal capacity C_{th} (b)

Дискретные спектры шестого порядка соответствуют участкам с переходным тепловым сопротивлением от кристалла транзистора к корпусу и обозначены R1–R6. Участки, обозначенные R1, R2, идентифицируются как область кристалла; R3–R5 – припой и рамка выводная; R6 – начальная часть переходного сопротивления корпус–внешняя среда.

Обсуждение результатов

В переходном слое на границе полупроводник–припой тепловое сопротивление возрастает из-за изменения механизма теплопереноса. Наличие дефектов в этой области в виде отслоения припоя, пустот и трещин приводит к дополнительному росту теплового сопротивления в результате уменьшения активной площади переходного слоя.

В то же время тепловая емкость этого слоя существенно не изменяется, так как емкость переходного субмикронного слоя мала и при измерениях суммируется с емкостью кристалла. Этому критерию соответствует пик R3 на рисунках 2b и 3b, что позволяет связать его с границей кристалл–припой.

Пик R6 соответствует области резкого возрастания теплового сопротивления у всех образцов, что позволяет идентифицировать его как переходной слой корпус прибора–окружающая среда (воздух).

Спектры транзисторов 21v1 и 21v2 типа KT817Г (рисунок 1) различаются наибольшим разбросом теплового сопротивления в диапазоне R3–R4, в области границы кристалл припой и в слое припоя. Транзисторы типа 2N5192 и MJD44H11 (на рисунке не представлены) имеют качественно сходные спектры с KT817Г, а величина внутреннего теплового сопротивления в них коррелирует с размерами кристалла (таблица). В транзисторах KT817A n2 и n3 на рисунке 3 наблюдаются существенные изменения R_{th} в диапазоне значений R4–R5, что возможно свидетельствует о наличии объемных дефектов (пустот и полостей) в зоне посадки кристалла прибора.

Заключение

Проведена оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов, в частности структуры их теплового сопротивления, методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии. Установлено следующее.

Метод тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии позволяет эффективно контролировать распределение тепловых потоков в мощных полупроводниковых приборах, что необходимо для совершенствования конструкции, повышения качества посадки кристаллов изделий силовой электроники с целью снижения их перегрева.

У всех измеренных образцов тепловое сопротивление слоя посадки кристалла ($R3-R4$) вносит определяющий вклад во внутреннее тепловое сопротивление транзисторов.

Транзисторы КТ817Г имеют уровень теплового сопротивления переход–корпус в пределах 4,6 К/Вт.

Для образцов КТ817А уровень теплового сопротивления переход–корпус существенно выше и составляет 10,2 К/Вт.

Список использованных источников

1. *Farkas, G.* Thermal investigation of high power optical devices by transient testing / G. Farkas [et al.] // *Components and Packaging Technologies*, IEEE Transactions on. – 2005. – Vol. 28, No. 1. – P. 45–50.

2. *Smith, B.* Utility of transient testing to characterize thermal interface materials / B. Smith [et al.] // *EDA Publishing THERMINIC*. – 2007. – P. 6–11.

3. *Бумай, Ю.А.* Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов / Ю.А. Бумай [и др.] // *Электроника инфо*. – 2010. – № 3. – С. 58–59.

4. *Bumai, Yu.A.* Measurement and analysis of thermal parameters and efficiency of laser heterostructures and light-emitting diodes / Yu.A. Bumai, A.S. Vaskou,

V.K. Kononenko // *Metrology and Measurement Systems*. – 2010. – Vol. 17, No. 1. – P. 39–46.

5. *Васьков, О.С.* Метод тепловой релаксационной спектроскопии и определение параметров светодиодов / О.С. Васьков, В.К. Кононенко, В.С. Нисс // *Докл. БГУИР*. 2011. – № 4. – С. 74–79.

6. *Турцевич, А.С.* Исследование качества пайки кристаллов мощных транзисторов релаксационным импеданс-спектрометром / А.С. Турцевич [и др.] // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2012. – № 5. – С. 44–47.

7. *Васьков, О.С.* Диагностика технологических характеристик мощных транзисторов с помощью релаксационного импеданс-спектрометра тепловых процессов / О.С. Васьков [и др.] // *Изв. вузов. Материалы электронной техники*. – 2014. – № 1. – С. 47–52.

8. *Pape, H.* Development of a standard for transient measurement of junction-to-case thermal resistance / H. Pape [et al.] // *Microelectron. Reliability*. 2012. – Vol. 52, No. 7. – P. 1272–1278.

9. *Foster, R.M.* A reactance theorem / R.M. Foster // *Bell Syst. Tech. J.* 1924. – Vol. 3. м P. 259–267.

10. *Cauer, W.* Die siebschaltungen der fermmeldetechnik / W. Cauer // *Math. und Mechanik / Angew. Z.* – 1930. – Vol. 10, No. 5. – P. 425–433.

11. *Gulino, R.* Guidelines for using ST's MOSFET SMD packages / R. Gulino // *Application Note AN1703*. STMicroelectronics. – 2003. – P. 1/22–22/22.

Estimation of thermal parameters of power bipolar transistors by the method of thermal relaxation differential spectrometry

Niss V.S.¹, Vaskou A.S.¹, Turtsevich A.S.², Kerentsev A.F.², Kononenko V.K.³

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave, 65, 220013, Minsk, Belarus

²JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,
str. I.P. Kazintsa, 121A, 220108, Minsk, Belarus

³Belarusian State University,
str. Kurhatova, 5, 220064, Minsk, Belarus

Received 24.11.2014

Accepted for publication 07.09.2015

Abstract. Thermal performance of electronic devices determines the stability and reliability of the equipment. This leads to the need for a detailed thermal analysis of semiconductor devices. The goal of the work is evaluation of thermal parameters of high-power bipolar transistors in plastic packages TO-252 and TO-126 by a method of thermal relaxation differential spectrometry. Thermal constants of device elements and distribution structure of thermal resistance defined as discrete and continuous spectra using previously developed relaxation impedance spectrometer. Continuous spectrum, based on higher-order derivatives of the dynamic thermal impedance, follows the model of Foster, and discrete to model of Cauer. The structure of sample thermal resistance is presented in the form of six-chain electro-thermal RC model. Analysis of the heat flow spreading in the studied structures is carried out on the basis of the concept of thermal diffusivity. For transistor structures the area and distribution of the heat flow cross-section are determined. On the basis of the measurements the thermal parameters of high-power bipolar transistors is evaluated, in particular, the structure of their thermal resistance. For all of the measured samples is obtained that the thermal resistance of the layer planting crystal makes a defining contribution to the internal thermal resistance of transistors. In the transition layer at the border of semiconductor-solder the thermal resistance increases due to changes in the mechanism of heat transfer. Defects in this area in the form of delamination of solder, voids and cracks lead to additional growth of thermal resistance caused by the reduction of the active square of the transition layer. Method of thermal relaxation differential spectrometry allows effectively control the distribution of heat flow in high-power semiconductor devices, which is important for improving the design, improve the quality of landing crystals of power electronics products to reduce overheating.

Keywords: bipolar transistor, thermal resistance, heat flow cross-section, die attachment quality, solder defect.

Адрес для переписки:

Васьков О.С.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013 г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: etf@bntu.by

Address for correspondence:

Vaskou A.S.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave, 65, 220013 Minsk, The Republic of Belarus
e-mail: etf@bntu.by

Для цитирования:

Нисс В.С., Васьков О.С., Турцевич А.С., Керенцев А.Ф., Кононенко В.К.
Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов
методом тепловой релаксационной дифференциальной
спектрометрии
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256

For citation:

Niss V.S., Vaskou A.S., Turtsevich A.S., Kerentsev A.F., Kononenko V.K.
Estimation of thermal parameters of power bipolar transistors
by the method of thermal relaxation differential spectrometry
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 249–256

References

1. Farkas G., van Voorst Vader Q., Poppe A., Bog-nar G. Thermal investigation of high power optical devices by transient testing. *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, 2005, vol. 28, no. 1, pp. 45–50.
2. Smith B., Brunschweiler T., Michel B. Utility of transient testing to characterize thermal interface materials. *EDA Publishing THERMINIC 2007*, Budapest, 2007, pp. 6–11.
3. Bumai Yu.A., Vas'kov O.S., Kononenko V.K., Loma-ko V.M. Relaxation impedance spectrometer of thermal processes. *Elektronika info*, 2010, no. 3, pp. 58–59 (in Russian).
4. Bumai Yu.A., Vaskou A.S., Kononenko V.K. Measurement and analysis of thermal parameters and efficiency of laser heterostructures and light-emitting diodes. *Metrology and Measurement Systems*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 39–46.
5. Vaskou A.S., Kononenko V.K., Niss V.S. Thermal relaxation spectrometry method and determining the pa-rameters of light-emitting diodes. *Dokl. BGUIR*, 2011, no. 4, pp. 74–79 (in Russian).
6. Turtsevich A.S., Rubtsevich I.I., Solov'yov Ya.A., Vas'kov O.S., Kononenko V.K., Niss V.S., Kerentsev A.F. The investigation of quality of power-transistor crystals soldering by a transient impedance-spectrometer. *Technol-ogy and Designing in Electronic Equipment*, 2012, no. 5, pp. 44–47 (in Russian).
7. Vaskou A.S., Niss V.S., Kononenko V.K., Turtsev-ich A.S., Rubtsevich I.I., Solov'ev Ya.A., Kerentsev A.F. Diagnostics of technological characteristics of high-power transistors using relaxing impedance spectrometry of ther-mal processes. *Izv. Vuz. Materials Electron. Techn.*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 47–52 (in Russian).
8. Pape H., Schweitzer D., Chen L., Kutscherauer R., Walder M. Development of a standard for transient mea-surement of junction-to-case thermal resistance. *Microelec-tron. Reliability*, 2012, vol. 52, no. 7, pp. 1272–1278.
9. Foster R.M. A reactance theorem. *Bell Syst. Tech. J.* 1924, vol. 3, pp. 259–267.
10. Cauer W. Die siebschaltungen der fermmeldetechn-ik. *Z. Angew. Math. und Mechanik*, 1930, vol. 10, no. 5, pp. 425–433.
11. Gulino R. Guidelines for using ST's MOSFET SMD packages. *Application Note AN1703. STMicroelec-tronics*, 2003, pp. 1/22–22/22.