

УДК 621.315.592

ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ПОМОЩЬЮ РЕЛАКСАЦИОННОГО ИМПЕДАНС–СПЕКТРОМЕТРА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2014 г. О. С. Васьков, В. С. Нисс, В. К. Кононенко, А. С. Турцевич*, И. И. Рубцевич*, Я. А. Соловьев*, А. Ф. Керенцев*
Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
*ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск, Беларусь

На основе исследования переходных процессов при саморазогреве прямым током разработан и апробирован эффективный метод определения тепловых параметров мощных полевых транзисторов. С помощью разработанного релаксационного спектрометра тепловых процессов исследованы дифференциальные профили распределения теплового сопротивления транзисторов КП723Г, подобранных в партии в соответствии с режимами посадки их кристаллов на теплоотводящее основание. Спектры тепловых сопротивлений рассчитаны из анализа временной зависимости динамического теплового импеданса новым неразрушающим методом дифференциальной спектроскопии с использованием производных высших порядков (3–го порядка). Представлены как непрерывные (интегральные), так и дискретные спектры распределения внутреннего теплового сопротивления транзисторов, а также значения теплового сопротивления переход–корпус. Определены тепловые характеристики транзисторов КП723Г и их импортных аналогов IRLZ44 и IRLB3036. Разработан метод оценки активной площади приборов и установлено ее уменьшение с нагревом. Показано, что предложенные методики полезны при решении технологических проблем формирования слоев посадки кристаллов и создания промежуточных слоев между кристаллом и теплоотводящим основанием, а также для разработки тепловых моделей при SPICE–моделировании мощных полевых транзисторов и диодных излучателей.

Ключевые слова: мощные полевые транзисторы, эквивалентная схема, тепловое сопротивление, релаксационная спектрометрия, слой теплового промежуточного материала, тепловые параметры, КПД.

Введение

В последнее время в мире наблюдается рост числа техногенных катастроф, вызванных отказом техники. Существенную роль играет выбор температурного режима работы электронной аппаратуры. Возрастающая плотность монтажа электронных изделий приводит к увеличению плотности тепловых потоков в них. Оптимизация технологии монтажа кристаллов по тепловым параметрам, которые обеспечивают надежность изделий, актуальна. При этом следует учитывать экономическую составляющую производства. Способность отводить тепло от кристаллов мощных полупроводниковых приборов при существующем уровне технологии посадки кристаллов на теплоотводящее основание служит одним из основных сдерживающих факторов современной электроники, так как перегрев кристалла приводит к быстрой деградации его характеристик и резкому снижению времени работы или отказу приборов. Это обуславливает необходимость детального теплового анализа полупроводниковых приборов.

Теоретический анализ: электротепловая модель

Температура перегрева ΔT активной области прибора определяется полным тепловым сопротивлением его элементов и межэлементных соединений между p – n –переходом и теплоотводом. Согласно электротепловой аналогии, переходные процессы в полупроводниковой структуре описывают в рамках эквивалентных схем [1] в виде RC–цепочек — схем Фостера и Кауера. При остывании прибора временная зависимость температуры перегрева $\Delta T(t)$ подчиняется простому закону:

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

Здесь P_T — тепловая мощность, рассеиваемая прибором; R_i — тепловое сопротивление i –го структурного элемента; $\tau_i = R_i C_i$ — постоянная времени тепловой релаксации; C_i — теплоемкость элемента конструкции транзистора и теплоотвода; n — число компонентов.

В общем случае тепловое сопротивление структуры состав-

ляет $R_T = \sum_i^n R_i$, где величина n

Васьков Олег Семенович¹ — e-mail: o_vascov@mail.ru, **Нисс Владимир Семенович**¹ — кандидат физ.–мат. наук, **Кононенко Валерий Константинович**¹ — доктор физ.–мат. наук, e-mail: vklavik@gmail.com, **Турцевич Аркадий Степанович**² — доктор тех. наук, **Рубцевич Иван Иванович**² — кандидат тех. наук, **Соловьев Ярослав Александрович**² — кандидат тех. наук, **Керенцев Анатолий Федорович**²

¹Белорусский государственный университет, 220030, Беларусь, Минск, пр. Независимости, д. 4, ²ОАО «ИНТЕГРАЛ», 220108, Беларусь, Минск, ул. Казинца И.П., 121А

задает общее число структурных компонентов прибора. Динамическое тепловое сопротивление определяется как $R^*(t) = \Delta T(t)/P_T$ и находится из функциональной зависимости [1]

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

Как видно из уравнения (2), в случае, когда различие постоянных времени тепловой релаксации τ_i для ближайших компонентов структуры достаточно велико, величина $R^*(t)$ при $t \approx \tau_i$ дает значение теплового сопротивления R_i для i -го компонента.

Однако для сложных многослойных структур, к которым относятся современные полупроводниковые приборы, функция (2) мало информативна. Поэтому вместо дифференциальной зависимости (2) целесообразно использовать функцию более высокого порядка, например m -го, в виде [2]

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

Переход от формулы (2) к выражению (3) позволяет, используя цифровые данные измерений, наиболее точно подобрать тепловые параметры структурных элементов. Такая методика дает возможность уточнить параметры компонент R_i и τ_i .

Достаточно ограничиться порядком $m = 3$ и, следовательно, зависимостью (3) для представления дифференциального спектра теплового сопротивления $R_3^*(t)$. При задании достаточно большого числа n структурных компонентов 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) [3, 4]. Развита дифференциальная методика дает возможность расширить число исследуемых тепловых структурных элементов до $n = 10$. Пример спектров теплового сопротивления исследованных транзисторов КП723Г приведен на рис. 1. Здесь использована семизвенная схема Кауера.

Методика определения активной площади транзисторов

В случае одномерного распространения теплоты в полубесконечной пластине от верхней части транзистора к теплоотводу (теплоотводящему основанию–радиатору) распределение температуры по глубине пластины подчиняется закону [5–8]

$$T(x,t) = \frac{P}{S_a} \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{\pi k \sqrt{t}}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right), \quad (4)$$

где α — коэффициент температуропроводности; k — коэффициент теплопроводности; P — подводи-

мая тепловая мощность, которая рассеивается через активную площадь сечением S_a . Коэффициент $\alpha = k/c_p\rho$, где c_p — удельная теплоемкость; ρ — плотность. Для Si значение $c_p\rho$ составляет $1,69 \text{ Дж/см}^3 \cdot \text{К}$. Так как при этом $k = 1,49 \text{ Вт/(см} \cdot \text{К)}$, то получим $\alpha = 0,88 \text{ см}^2/\text{с}$. Таким образом, нагрев поверхности кристалла подчиняется закону

$$\Delta T(t) = \frac{P}{S_a} \frac{2\sqrt{\alpha}\sqrt{t}}{\sqrt{\pi k}}, \quad (5)$$

и время корневого закона изменения температуры p – n -перехода при импульсном электрическом возбуждении транзистора лежит в интервале $\sim 0,1\text{--}1,0 \text{ мс}$ [7]. Это позволяет определить активную площадь транзистора S_a в зависимости от мощности импульса возбуждения P .

Этот вывод следует из решения нестационарного уравнения теплопроводности, которое имеет вид [5]

$$T(t) = PR_T \left(2\sqrt{\frac{t}{\pi\tau}} + \sum_{n=1}^{\infty} 4(-1)^n \times \right. \\ \left. \times \left\{ \sqrt{\frac{t}{\pi\tau}} e^{-\frac{n^2\tau}{t}} - n \left[1 - \operatorname{erf}\left(n\sqrt{\frac{\tau}{t}}\right) \right] \right\} \right). \quad (6)$$

На начальном участке нагрев активной области прибора прямо пропорционален \sqrt{t} :

$$\Delta T(t) = \frac{2PR_T}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\tau}}, \quad (7)$$

где постоянная времени тепловой релаксации $\tau = (R_T S_a)^2 k c_p \rho$; R_T — тепловое сопротивление активного слоя площадью S_a . Для Si постоянная тепловой релаксации составляет порядка $\tau \approx 3 \text{ мс}$, и начальный участок нагрева (в нормированных единицах) соответствует времени $t \leq 0,4\tau$ (рис. 2).

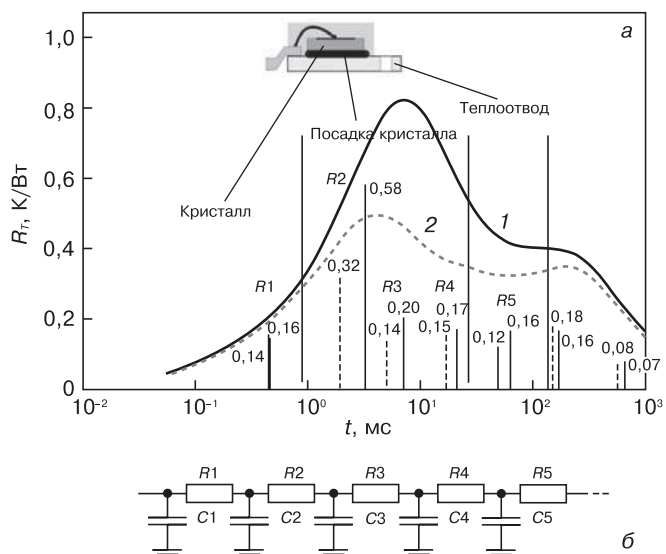


Рис. 1. Непрерывный (1, 2) и дискретные (вертикальные линии) спектры теплового сопротивления $R_T(t)$ транзисторов КП723Г (а) при разных режимах пайки и электротепловая схема Кауера (б), для которой указаны первые пять звеньев RC-цепи

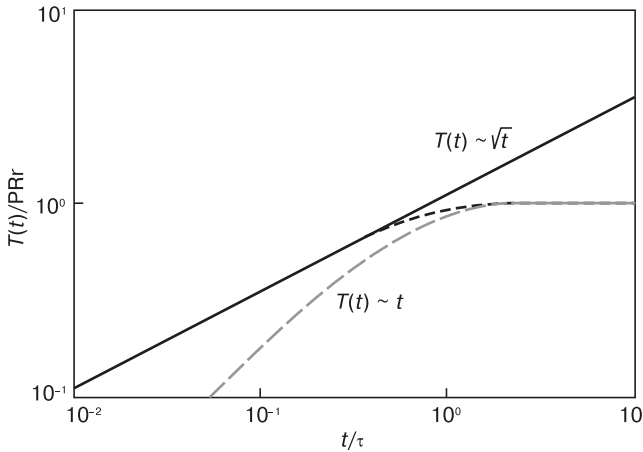


Рис. 2. Изменение температуры $T(t)$ активной области прибора, начальный участок нагрева прямо пропорционален \sqrt{t} и совпадает с точным решением уравнения (6), в отличие от линейной зависимости $T(t) \sim t$

Экспериментальная часть

В случае оптимизации технологии всегда следует учитывать экономическую составляющую производства. При изготовлении мощных DMOS-транзисторов (МОП- транзисторы с двойной диффузией) КП723 [9] используют медный сплав с высокой теплопроводностью (3,6 Вт/(см · К)). Требуемый профиль лент достигают механическим фрезерованием, что позволяет в процессе вырубki кадровых рамок выводных обеспечивать толщину кристаллодержателя на уровне 1,27 мм. Такая конструкция рамки приводит к высокой себестоимости одного кадра сборки (примерно 0,06 долл. США)). Для снижения себестоимости на 40 % опробован ленточный материал из более дешевого материала К-65, но с более низкой теплопроводностью 2,6 Вт/(см · К) и выполненный в виде монослоя меньшей толщины (1,20 мм). В этом случае изготовление рамки выводной осуществляют методом ковки. Такая конструкция применима

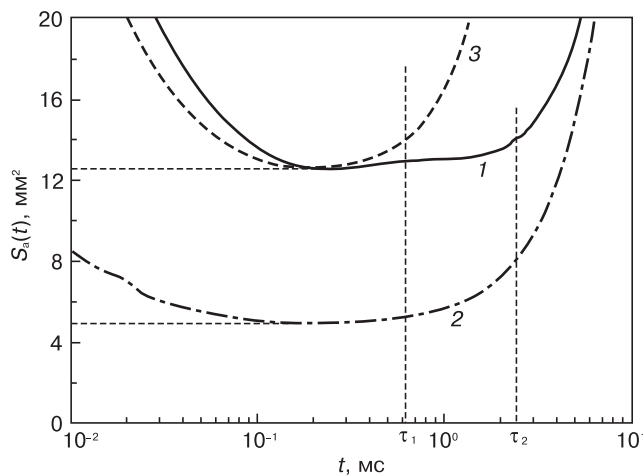


Рис. 3. Изменение активной площади S_a в зависимости от длительности t импульса возбуждения кристалла для различных транзисторов: 1 — DMOS-транзистор КП723Г (Интеграл); 2, 3 — VDMOS-транзисторы IRLZ44 и IRLB3036 (International Rectifier) соответственно

только для пассивного технологического процесса монтажа кристаллов на припой в конвейерной печи в среде водорода.

Значения активной площади ряда образцов транзисторов находили по методике начального корневого участка разогрева полупроводниковых приборов. Границы временного корневого участка возбуждения типичных мощных транзисторов соответствуют времени 0,1—2 мс (рис. 3).

Исследование качества пассивного процесса монтажа кристаллов КП723 на припой в среде водорода при температуре 360—440 °С проведено с использованием разработанного релаксационного импеданс-спектрометра [10]. Из анализа зависимости температуры активной области приборов от времени находят внутреннее тепловое сопротивление транзистора и его структуру в виде дискретного и непрерывного спектра — зависимости от постоянных времени тепловой релаксации [1, 2].

При измерениях спектры внутреннего теплового сопротивления транзисторов аппроксимировали семизвенной RC-цепью по схеме Фостера—Кауера (см. рис. 1). Компоненты цепи идентифицировали как следующие элементы: R1 — тепловое сопротивление кристалла; R2 — тепловое сопротивление границы кристалл—припой; R3 — тепловое сопротивление припоя; R4 — тепловое сопротивление границы припой—теплоотвод; R5 — тепловое сопротивление теплоотвода; R6 и R7 — тепловое сопротивление части сопротивления «корпус — внешняя среда». Наиболее существенный вклад в суммарное тепловое сопротивление R_{jc} -транзистора от p—n-перехода до радиатора-корпуса вносит сопротивление R2, которое составляет порядка 50 % R_{jc} , что связано, по-видимому, с наличием пустот в области посадки кристалла.

Качество посадки кристаллов приборов контролировали также с помощью анализа изображений, полученных методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) [11]. Состояние припоя в зависимости от температурного режима посадки кристалла показано на рис. 4. Дефектность границы кристалл—припой, которую определяли из анализа компонентов спектра теплового сопротивления транзисторов КП723Г, характеризуется площадью дефектов (воздушных карманов) S_{def} относительно площади кристалла $S_{кр}$ [12].

Результаты и их обсуждение

Разработанный эффективный метод измерения активной площади кристаллов полупроводниковых приборов основан на временном анализе диффузии теплового потока (в одномерном полубесконечном приближении) из измерений дифференциальной температуры перегрева полупроводникового кристалла в начальный (нагрев/остывание) ≤ 100 мкс интервал времени. Из исследований температур-



Рис. 4. Изображения ($\times 5,5$) состояния припоя, полученные методом РЭМ, после стравливания кристаллов транзисторов КП723Г в зависимости от температурного режима посадки кристалла на теплопроводящее основание: а — $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$, $S_{\text{деф}} \approx (5\%)S_{\text{кр}}$; б — $T = 440\text{ }^\circ\text{C}$, $S_{\text{деф}} \approx (30\%)S_{\text{кр}}$; в — $T = 480\text{ }^\circ\text{C}$, $S_{\text{деф}} \approx (45\%)S_{\text{кр}}$

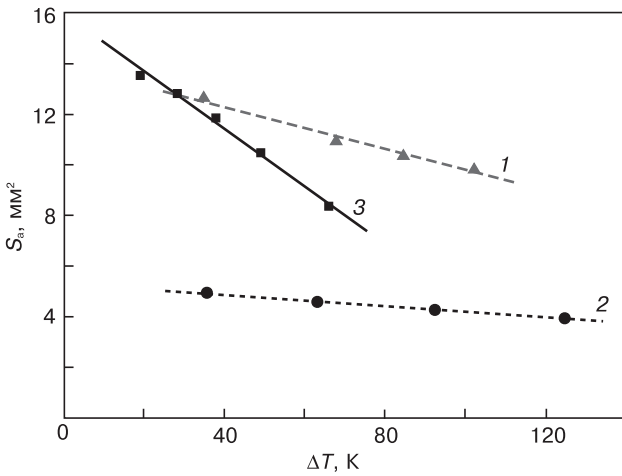


Рис. 5. Изменение активной площади S_a в зависимости от температуры перегрева кристалла ΔT для DMOS– (1) и VDMOS– (2, 3) транзисторов:
1 — КП723, $S_a = 14,0(1 - 0,003\Delta T)$, $R^2 = 0,965$;
2 — IRLZ44, $S_a = 5,3(1 - 0,002\Delta T)$, $R^2 = 0,997$;
3 — IRLB3036, $S_a = 15,9(1 - 0,007\Delta T)$, $R^2 = 0,992$

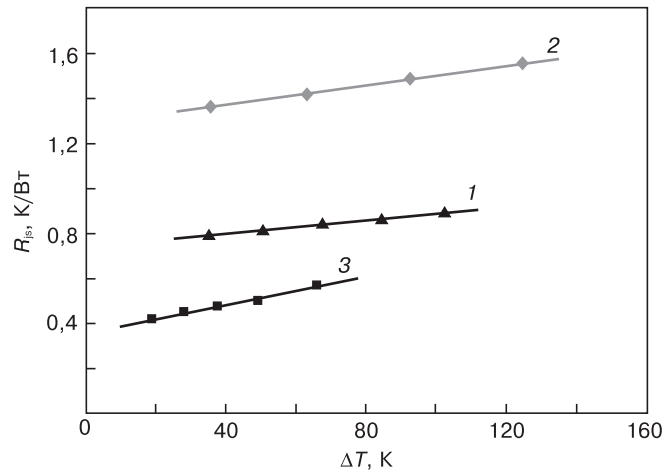


Рис. 6. Изменение суммарного теплового сопротивления $p-n$ -переход–корпус $R_{жс}$ в зависимости от температуры перегрева ΔT кристалла для DMOS–транзистора КП723Г (1) и VDMOS–транзисторов IRLZ44 (2) и IRLB3036 (3):
1 — $y = 0,0015x + 0,7381$, $R^2 = 0,985$; 2 — $y = 0,0022x + 1,2832$, $R^2 = 0,999$; 3 — $y = 0,0031x + 0,3654$, $R^2 = 0,982$

ных зависимостей активной площади кристаллов для различных типов мощных кремниевых DMOS–транзисторов в диапазоне рабочих температур ($20\text{--}170\text{ }^\circ\text{C}$) выявлено, что для VDMOS–транзисторов (радиочастотных полевых транзисторов с изолированным затвором) IRLB3036 фирмы International Rectifier активная площадь кристаллов достаточно сильно уменьшается с ростом температуры перегрева (на $0,7\text{ } \%/K$) (рис. 5). Для DMOS–транзисторов КП723 ОАО «Интеграл» такое уменьшение составляет всего $0,3\text{ } \%/K$. Зависимость S_a от ΔT не может быть обусловлена только изменением теплопроводности кристалла Si.

Возможная причина аномальных изменений активной площади кристаллов связана со шнурованием тока или «схлопыванием» отдельных транзисторных ячеек из-за роста числа так называемых горячих точек (*hot spots*) в активной области прибора [13, 14]. В зависимости от температуры перегрева кристалла варьируется внутреннее тепловое сопротивление и его структура. Изменение активной площади кристаллов приводит к модуляции сечения теплового

потока в приборах и, следовательно, к модуляции $R_{жс}$ (рис. 6).

Анализ изменений активной площади кристал-

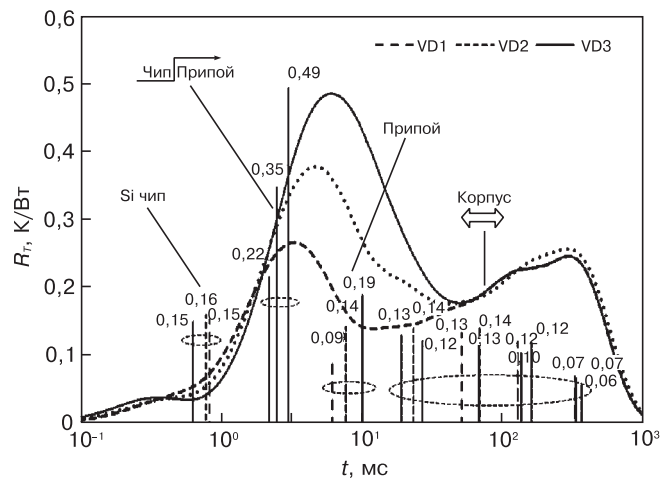


Рис. 7. Дифференциальные спектры теплового сопротивления $R_T(t)$ транзисторов КП723Г при разном качестве посадки в зависимости от температурного режима изготовления (VD1, VD2, VD3)

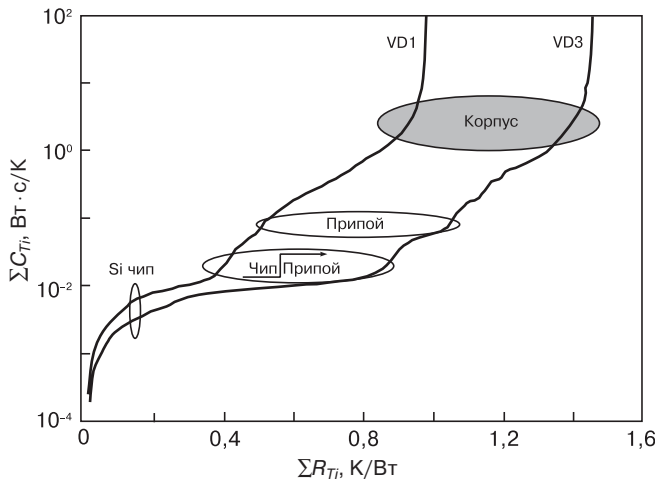


Рис. 8. Кумулятивные структурные функции транзисторов КР723Г при разном качестве посадки в зависимости от температурного режима изготовления (VD1, VD3), построенные методом TDIM–Master [8]

лов и спектров теплового сопротивления показал, что при температурах перегрева выше 100 °С свойства активной зоны кристалла вносят заметный вклад в тепловое сопротивление полупроводниковых приборов. Качество посадки прибора отражается на спектрах теплового сопротивления (рис. 7) и структурных функциях (рис. 8). Основной вклад в тепловое сопротивление связан с величиной R_T , отражающей пограничную область между кристаллом Si и припоем к держателю транзистора. Очевидно, ухудшение качества посадки кристалла на теплопроводящее основание приводит к сдвигу структурных функций, так как возрастает в основном величина теплового сопротивления пограничной области из-за растекания теплового потока. При этом теплоемкость слоя практически не изменяется, а тепловые параметры остальных компонентов приборов остаются прежними.

Заключение

Анализ спектров для девяти партий транзисторов КР723 (отличающихся температурным режимом и длительностью обработки при посадке кристаллов на теплопроводящее основание) показал, что наиболее существенный вклад в суммарное тепловое сопротивление R_{jc} вносит сопротивление границы кристалл–припой, величина которого составляет порядка 50 % R_{jc} . Высокое тепловое сопротивление границы вызвано рассогласованием фоновых подсистем по обе стороны границы металл–полупроводник и обусловлено наличием пустот в области припоя.

Тепловая модель транзистора КР723 представляет собой семизвенную цепь. Разброс теплового сопротивления транзисторов определяется площадью дефектов границы кристалл–припой, приводящих к модуляции сечения теплового потока от активного слоя к корпусу транзисторов. Оценки показали, что

площадь дефектов может составлять до 45 % площади кристалла. Основной тип дефектов — воздушные карманы (пустоты).

Исследованы температурные зависимости активной площади кристалла S_a для различных типов мощных кремниевых DMOS–транзисторов в диапазоне их рабочих температур (20—170 °С). Выявлено, что для транзисторов IRLB3036 площадь S_a достаточно сильно (0,7 % на 1 °С) уменьшается с ростом температуры перегрева, в отличие от образцов КР723 (0,3 %) и IRZ44 (0,2 %). Возможная причина обнаруженных изменений S_a связана со шнурованием тока или ростом числа горячих точек в активной области прибора. При температурах перегрева более 80 °С свойства активной зоны кристалла вносят существенный вклад в тепловое сопротивление полупроводниковых приборов.

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 мощных транзисторов и диодных излучателей.

Библиографический список

1. 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. – V. 7, N 1. – P. 39–46.
2. 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.
3. Masana, F. N. A new approach to the dynamic thermal modelling of semiconductor packages / F. N. Masana // Microelectron. Reliability. – 2001. – V. 41, N 6. – P. 901–912.
4. Farkas, G. Thermal investigation of high power optical devices by transient testing / G. Farkas, Q. van V. Vader, A. Poppe, G. Bognar // IEEE Trans. Components and Packaging Technol. – 2005. – V. 28, N 1. – P. 45–50.
5. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 486 с.
6. Bagnoli, P. E. Thermal resistance analysis by induced transient (TRAIT) method for power electronic devices thermal characterization (Pt. 1 and 2) / P. E. Bagnoli, C. Casora, E. Dallago, M. Nardoni // IEEE Trans. Power Electron. – 1998. – V. 13, N 6. – P. 1208–1228.
7. Glavanovics, M. Thermal destruction testing: an indirect approach to a simple dynamic thermal model of smart power switches / M. Glavanovics, H. Zitta // Proc. ESSIRC. – 2001. – P. 236–239.
8. Pape, H. Development of a standard for transient measurement of junction-to-case thermal resistance / H. Pape, D. Schweitzer, L. Chen, R. Kutscherauer, M. Walder // Microelectron. Reliability. – 2012. – V. 52, N 7. – P. 1272–1278.
9. Керенцев, А. Ф. Конструктивно–технологические особенности MOSFET–транзисторов / А. Ф. Керенцев, В. Л. Ланин // Компоненты и технологии. – 2007. – № 4. – С. 100–104.
10. Бумай, Ю. А. Релаксационный импеданс–спектрометр тепловых процессов / Ю. А. Бумай, О. С. Васьков, В. К. Кононенко, В. М. Ломако // Электроника инфо. – 2010. – № 3. – С. 58–59.
11. Васьков, О. С. Диагностика технологических характеристик мощных транзисторов с помощью релаксационного импеданс–спектрометра тепловых процессов / О. С. Васьков, В. С. Нисс, В. К. Кононенко, А. С. Турцевич, И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьев, А. Ф. Керенцев // Книга тез. IX Междунар. конф. «Кремний–2012». – СПб., 2012. – С. 152–153.
12. Турцевич, А. С. Исследование качества пайки кристаллов мощных транзисторов релаксационным импеданс–спектрометром / А. С. Турцевич, О. С. Васьков, И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьев, О. С. Васьков, В. К. Кононенко, В. С. Нисс, А. Ф. Керенцев // ТКЭА. – 2012. – № 5. – С. 44–47.

13. Huang, W. HotSpot: A compact thermal modeling methodology for early-stage VLSI design / W. Huang, S. Ghosh, S. Velusamy, K. Sankaranarayanan, K. Skadron, M. R. Stan // *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst.* – 2006. – V. 14, N 5. – P. 501–513.

14. Wang, X. Bias-dependent MOS transistor thermal resistance and non-uniform self-heating temperature / X. Wang, Y. Ezzahri, J. Christofferson, A. Shakouri // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2009. – V. 42, N 7. – P. 075101–1–5.

Статья поступила в редакцию 10 июня 2013 г.

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics.* 2014, vol. 17, no. 1, pp. 47–52.

Diagnostics of Technological Characteristics of High-Power Transistors Using Relaxing Impedance Spectrometry of Thermal Processes

Vaskou Oleg Semenovich¹ — e-mail: o_vascov@mail.ru; **Niss Vladimir Semenovich**¹ — Candidate of Physics and Mathematics; **Kononenko Valerii Konstantinovich**¹ — Doctor of Physics and Mathematics, e-mail: vkladik@gmail.com; **Turtsevich Arkadii Stepanovich**² — Doctor of Technical Sciences; **Rubtsevich Ivan Ivanovich**² — Candidate of Technical Sciences; **Solov'ev Yaroslav Aleksandrovich**² — Candidate of Technical Sciences; **Kerentsev Anatolii Fedorovich**²

¹Belarusian State University, 220030, Belarus, Minsk, Nezavisimosti ave., 4; ²JSC «INTEGRAL» – Holding Management Company, 220108, Belarus, Minsk, Kazitsa I. P. Str., 121A

Abstracts. The efficient method of determining thermal parameters in high-power field-effect transistors has been developed and tested based on a study of transient processes during self heating by direct current. With the developed relaxation spectrometer of thermal processes differential distribution profiles of thermal resistance of KP723G transistors have been investigated which were selected in accordance with the regimes of setting of their crystals. Thermal resistance spectra have been obtained from the analysis of time-dependent dynamic thermal impedance using a new non-destructive method of differential spectroscopy using higher order derivatives (order 3). We present both continuous (integral) and discrete spectra of the distribution of internal thermal resistance in the transistors and the value of the junction/case thermal resistance. Thermal characteristics of the KP723G transistors and their imported counterparts IRLZ44 and IRLB3036 have been determined. The method of determining the active area of devices has been developed and its decrease during heating has been shown. The proposed methodology is useful in solving technological problems of forming the setting layers of crystals and intermediate layers between a crystal and a heat sink and also for the development of thermal models in SPICE modeling of powerful MOSFETs and diode emitters.

Keywords: MOSFET, equivalent scheme, thermal resistance, relaxation spectrometry, thermal-interface-material (TIM) layer, thermal parameters, efficiency

Referensece

1. 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. 7, no. 1, pp. 39–46.

2. Vas'kov O. S., Kononenko V. K., Niss V. S. Method of thermal relaxation spectrometry and determination of parameters of light-emitting diodes. *Dokl. BGUIR.* 2011, no. 4, pp. 74–79.

3. Masana F. N.A new approach to the dynamic thermal modelling of semiconductor packages. *Microelectron. Reliability.* 2001, vol. 41, no. 6, pp. 901–912.

4. Farkas G., van Vader Q. V., Poppe A., Bognar G. Thermal investigation of high power optical devices by transient testing. *IEEE Trans. Components and Packaging Technol.* 2005, vol. 28, no. 1, pp. 45–50.

5. Karslou G., Eger D. Conduction of heat in solids. *Moscow: Nauka,* 1964. 488 p.

6. Bagnoli P. E., Casora C., Dallago E., Nardoni M. Thermal resistance analysis by induced transient (TRAIT) method for power electronic devices thermal characterization (Pt. 1 and 2). *IEEE Trans. Power Electron.* 1998, vol. 13, no. 6, pp. 1208–1228.

7. Glavanovics M., Zitta H. Thermal destruction testing: an indirect approach to a simple dynamic thermal model of smart power switches. *Proc. ESSIRC.* 2001, pp. 236–239.

8. Pape H., Schweitzer D., Chen L., Kutscherauer R., Walder M. Development of a standard for transient measurement of junction-to-case thermal resistance. *Microelectron. Reliability.* 2012, vol. 52, no. 7, pp. 1272–1278.

9. Kerentsev A. F., Lanin V. L. Constructive and technological features of MOSFET transistors. *Komponenty i tehnologii.* 2007, no. 4, pp. 100–104.

10. Bumai Yu. A., Vas'kov O. S., Kononenko V. K., Lomako V. M. Relaxation impedance spectrometer of thermal processes. *Elektronika info.* 2010, no. 3, pp. 58–59.

11. Vas'kov O. S., Niss V. S., Kononenko V. K., Turtsevich A. S., Rubtsevich I. I., Solov'ev Ya. A., Kerentsev A. F. Diagnostics of technical characteristics on powerful transistors by means of relaxation an impedance spectrometer of thermal processes. *Kniga tez. IX Mezhdunar. konf. «Kremnii-2012».* SPb., 2012. pp. 152–153.

12. Turtsevich A. S., Vas'kov O. S., Rubtsevich I. I., Solov'ev Ya. A., Vas'kov O. S., Kononenko V. K., Niss V. S., Kerentsev A. F. Research of quality of the soldering of crystals of powerful transistors relaxation impedance spectrometer. *TKEA.* 2012, no. 5, pp. 44–47.

13. Huang, W., Ghosh S., Velusamy S., Sankaranarayanan K., Skadron K., Stan M. R. HotSpot: A compact thermal modeling methodology for early-stage VLSI design. *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst.* 2006, vol. 14, no. 5, pp. 501–513.

14. Wang X., Ezzahri Y., Christofferson J., Shakouri A. Bias-dependent MOS transistor thermal resistance and non-uniform self-heating temperature. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009, vol. 42, no. 7, pp. 075101–1–5.

Received June 10, 2013