

ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ, СТРУКТУРА И ДЕФЕКТНОСТЬ ПОСАДКИ МОЩНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

О. В. Васьков¹, В. К. Кононенко¹, В. С. Нисс¹, А. С. Турцевич²,
И. И. Рубцевич², Я. А. Соловьев², А. Ф. Керенцев²

¹БНТУ, o_vascov@mail.ru;

²ОАО «Интеграл», AKerentsev@transistor.com.by

ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация технологии монтажа кристаллов по тепловым параметрам повышает надежность изделий силовой электроники [1]. Особенности мощных полевых транзисторов постоянно учитываются на производстве [2, 3].

В настоящей работе исследовано качество пассивного монтажа кристаллов КП723 на припой в среде водорода при температурах 360–440 °С. Тепловые параметры транзисторов определены с помощью релаксационного импеданс-спектрометра [4]. Из измерений температуры активной области транзисторов находятся компоненты внутреннего теплового сопротивления. Это позволяет провести анализ качества посадки кристаллов на теплоотводящее основание и установить изменение активной площади приборов в зависимости от температуры перегрева кристаллов.

МЕТОД РЕЛАКСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Метод релаксационной дифференциальной спектроскопии тепловых процессов обладает достаточной точностью и применим к транзисторам, светодиодам, гетеролазерам [5]. При анализе структуры теплового сопротивления посадки полупроводник–металл достигается более высокое разрешение (более чем в три раза) по сравнению с известными методами.

Температура перегрева ΔT активной области прибора определяется полным тепловым сопротивлением его компонентов между p - n -переходом и теплоотводом. Согласно электротепловой аналогии, переходные процессы в структуре описываются в рамках эквивалентных RC -цепей – схем Фостера и Кауэра [5]. При остывании прибора временная зависимость $\Delta T(t)$ следует закону $\Delta T(t) = P_T \sum_i^n R_i \exp(-t/\tau_i)$. 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 транзистора, n – число компонентов. В общем случае тепловое сопротивление структуры составляет $R_T = \sum_i^n R_i$.

Динамическое тепловое сопротивление определяется как $R^*(t) = \Delta T(t)/P_T$ и находится из функциональной зависимости

$$R^*(t) = \sum_i^n R_i(t/\tau_i) \exp(-t/\tau_i), \quad (1)$$

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. Однако для сложных многослойных структур дифференциальная функция (1) мало информативна, и целесообразно использовать функцию более высокого порядка [6], например m -го:

$$R_m^*(t) = \sum_i^n R_i (t/m\tau_i)^m \exp(m(1-t/m\tau_i)), \quad (2)$$

Переход от (1) к (2) позволяет, используя цифровые данные измерений, наиболее точно подобрать тепловые параметры структурных элементов (R_i , τ_i) и расширить число исследуемых компонентов до $n = 10$. Обычно число анализируемых тепловых структурных элементов определяется мощностью программных симуляторов и эффективностью используемых нестационарных тепловых тестеров и ограничивается $n = 3 \div 5$ (из-за технических трудностей измерений) [7]. Для анализа тепловых параметров транзисторов часто используется также метод структурных функций, который постоянно уточняется [8, 9].

ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Спектры теплового сопротивления транзисторов аппроксимировались семизвенной RC-цепью (рис. 1). Основные компоненты идентифицировались как элементы: R_1 – тепловое сопротивление кристалла, R_2 – границы кристалл–припой, R_3 – припоя, R_4 – границы припой–теплоотвод, R_5 – теплоотвода. Для транзисторов КП723 заметный вклад в тепловое сопротивление R_{jc} вносит сопротивление R_2 , величина которого порядка 50% R_{jc} , что связано с рассогласованием фононных подсистем по обе стороны границы полупроводник–металл и наличием пустот. Качество посадки кристаллов контролировалось с помощью анализа РЭМ-изображений. Данные, полученные обоими методами, хорошо коррелируют между собой.

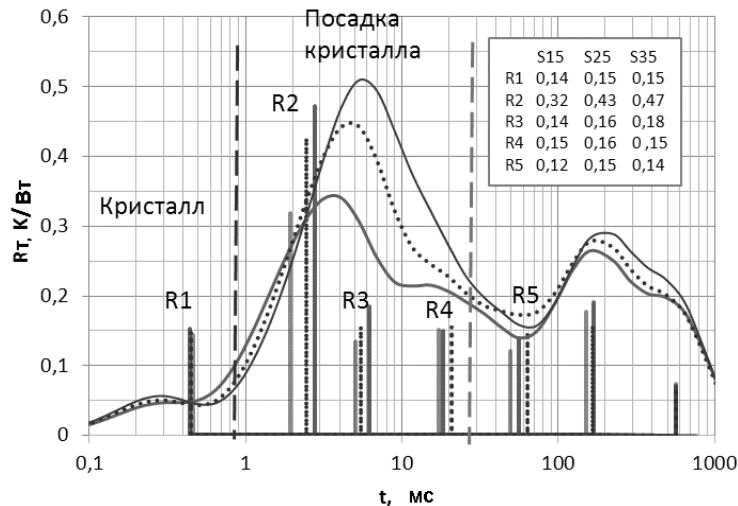


Рис. 1. Спектры теплового сопротивления транзисторов партий S15, S25 и S35 в схеме Кауера

Из измерений дифференциальной температуры перегрева области перехода ($\Delta T(t)$ в начальный (нагрев/остывание) $\leq 10^{-4}$ с временной интервал t находится активная площадь S_a кристаллов транзисторов. Данный метод основан на описании распространения теплового потока в полубесконечном приближении ($\Delta T(t) \sim t^{1/2}/S_a$). Температурные зависимости S_a изучены для различных типов мощных транзисторов в широком диапазоне рабочих температур (20–170 °C) (рис. 2). Величина S_a для VDMOS-

транзисторов IRLB3036 достаточно сильно (0,7% на 1 °С) уменьшается с ростом температуры перегрева кристалла. Для DMOS-транзисторов КП723 это изменение S_a составляет 0,3%. Наиболее слабая зависимость S_a от температуры (0,2%) наблюдается для VDMOS-транзисторов IRLZ44.

Изменение S_a сопровождается вариацией сечения теплового потока в приборах, варьируется внутреннее тепловое сопротивление и его структура. При температурах перегрева выше 100 °С свойства кристалла влияют на тепловое сопротивление. Одна из причин заметных изменений S_a связана со шнурованием тока или “схлопыванием” отдельных транзисторных ячеек из-за роста числа так называемых горячих точек (hot spots) в активной области [10]. Предложенная методика полезна при исследовании механизмов деградации мощных транзисторов, оптимизации технологии монтажа кристаллов, разработке SPICE-моделей приборов.

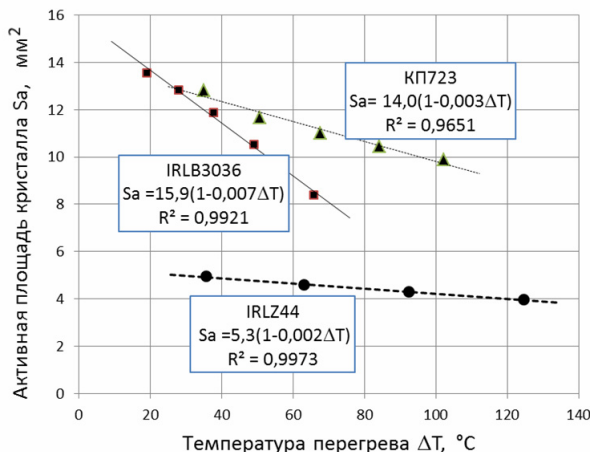


Рис. 2. Зависимость активной площади транзисторов разных производителей от температуры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зависимости от температуры кристалла определены внутреннее тепловое сопротивление и его структура для мощных полевых транзисторов. С ростом перегрева кристалла варьируется сечение теплового потока в приборах и уменьшается активная площадь S_a . Разработанный метод показывает, что для транзисторов КП723 изменение S_a составляет 0,3% на 1 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бумай, Ю.А. Проблемы посадки кристаллов мощных кремниевых MOSFET транзисторов / Ю. А. Бумай [и др.] // Сб. науч. тр. II Конгресс физиков Беларуси. Минск, 2008. С. 97–98.
2. Ануфриев, Л.П. Автоматизированный монтаж кристаллов транзисторов вибрационной пайкой / Л. П. Ануфриев, А. Ф. Керенцев, В. Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 3. С. 47–50.
3. Керенцев, А.Ф. Конструктивно-технологические особенности MOSFET-транзисторов / А. Ф. Керенцев, В. Л. Ланин // Компоненты и технологии. 2007. № 4. С. 100–104.
4. Бумай, Ю.А. Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов / Ю. А. Бумай, О. С. Васьюков, В. К. Кононенко, В. М. Ломако // Электроника инфо. 2010. № 3. С. 58–59.

5. *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.
6. *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.
7. *Szekely, V.* Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: A measurement and identification method / V. Szekely, T. V. Bien // Solid-State Electron. 1988. Vol. 31, No. 9. P. 1363–1368.
8. *Schweitzer, D.* Transient measurement of the junction-to-case thermal resistance using structure functions: chances and limits / D. Schweitzer, H. Pape, L. Chen // Proc. 24th IEEE SEMI-THERM Symposium. San Jose, 2008. P. 193–199.
9. *Pape, H.* Development of a standard for transient measurement of junction-to-case thermal resistance / H. Pape [et al.] // Microelectronics Reliability. 2012. Vol. 52, No. 7. P. 1272–1278.
10. *Huang, W.* Hotspot: A compact thermal modeling methodology for early-stage VLSI design / W. Huang [et al.] // IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst. 2006. Vol. 14, No. 5. P. 501–513.