

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОЩНЫХ ДМОП ТРАНЗИСТОРОВ.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Горчанин Д. И.

Петлицкая Т.В. – канд. техн. наук, доцент

Методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии (ТРДС), были исследованы профили растекания теплового потока и структура внутреннего теплового сопротивления экспериментальных мощных ДМОП транзисторов КП7209, КП723, изготовленных при различных температурных режимах и методах посадки кристалла. Для оценки надежности транзисторов проводились испытания на длительное воздействие термоударом в интервале температур от –196 до +200°С с контролем тепловых параметров через каждые 100 термоударов.

Релаксационный метод основан на анализе переходных электрических процессов, связанных с разогревом полупроводникового прибора проходящим через него током. 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  $\tau$ . Дифференциальный спектр определяется на основе производных высшего порядка динамического теплового импеданса и соответствует модели Фостера, а дискретный – модели Кауера. Два вида спектров (непрерывной и дискретный) теплового сопротивления используются для анализа и уточнения компонентов теплового сопротивления в рамках электротепловой модели Фостера и более физически точной модели Кауера. Временные зависимости изменения напряжения на  $p-n$  переходе, которые дают возможность анализа путей прохождения теплового потока по элементам структуры, измеряются при помощи импеданс-спектрометра тепловых процессов [1], разработанного в БНТУ.

В случае одномерного распространения теплоты в полубесконечной пластине от верхней части транзистора (исток) к теплоотводу распределение температуры  $T(x, t)$  по глубине следует закону [2]:

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

Нагрев поверхности кристалла следует закону:

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

и время корневого закона изменения температуры  $p-n$  перехода при импульсном электрическом возбуждении транзистора охватывает длительности порядка 0,1–1 мс [2]. Это позволяет определить активную площадь транзистора  $S_a$  в зависимости от мощности  $P$  импульса возбуждения.

Этот вывод следует из решения нестационарного уравнения теплопроводности [3]. На начальном участке нагрев активной области прибора прямо пропорционален  $\sqrt{t}$ :

$$\Delta T(t) = \frac{2PR_{th}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\tau}}$$

где  $\tau = (R_{th}S_a)^2 k c_p \rho$  – постоянная тепловой релаксации, а  $R_{th}$  – тепловое сопротивление активного слоя площадью  $S_a$ . Для  $S_i$  постоянная тепловой релаксации составляет величину порядка  $\tau \approx 3$  мс и начальный участок нагрева соответствует временам  $t \leq 0,4\tau$ . [2].

Для определения распределения площади теплового потока от поверхности кристалла до внешнего корпуса используем анализ растекания теплового потока на основе концепции температуропроводности или тепловой эффузии для слоистых компонентов полупроводникового прибора.

Если использовать соотношение между тепловыми характеристиками  $R_{th}$  и  $C_{th}$  слоистых компонентов структуры в виде:

$$\frac{R_{th}}{C_{th}} = \frac{\alpha}{\kappa^2 S_a^2} = 1/\kappa\rho c_p S_a^2$$

то можно определить изменение активной площади  $S_a$  при распространении теплоты вдоль перехода к подложке, теплоотводу и окружающей среде. Послойные значения компонентов теплового сопротивления  $R_{th}$  и тепловой емкости  $C_{th}$ , можно установить из анализа дискретного спектра теплового сопротивления измеряемой структуры [1].

Как известно [2], тепловая эффузия  $e = \kappa/\alpha^2 = (\kappa\rho c_p)^{\frac{1}{2}}$  прямо связана с  $\kappa$  и  $\alpha$ , поэтому ее экспериментальное значение задается, как

$$e^* = \frac{\sqrt{\frac{C_{th}}{R_{th}}}}{S_a^*}$$

где  $S_a$  - эффективная площадь полупроводниковой структуры, зависящая от особенностей конфигурации прибора и определяемая размерами слоев и площадью кристалла  $S_{кр}$ , а также коэффициентом его заполнения  $\gamma$ .

Значения активной площади кристаллов транзисторов находились по методике начального корневого участка разогрева полупроводниковых приборов. Границы временного корневого участка возбуждения типичных мощных транзисторов соответствуют практически временам 0,1–3мс.

Растекание теплового потока в кристалле определяющего его активную площадь зависит от особенностей конфигурации полупроводникового прибора и определяется размерами слоев и площадью чипа  $S_{ch}$ , а также коэффициентом его заполнения  $\gamma$ , который составляет практически 0,4–0,7.

Детальный анализ тепловой деградации образцов производился методом ТРДС [1] на основе дифференциальных и дискретных спектров 5-го порядка. Определены внутреннее тепловое сопротивление транзистора и его структура в виде тепловых спектров исходного образца (до термоиспытания)  $S_0$  и спектры  $S_T$  после каждой серии циклов по 100 термоударов.

Электротепловые параметры кремниевых кристаллов, используемые для идентификации интерфейсной границы кристалл–слой посадки в исследуемых образцах, представлены в таблице 1.

Таблица 1 –Электротепловые параметры кристаллов исследуемых образцов

Тип прибора (корпус)	$R_{jc}$ пасп. $\frac{К}{Вт}$	$S_{кр}$ , мм <sup>2</sup>	$d$ , мм	$\frac{\kappa,}{\text{ВТ}} \frac{\text{ВТ}}{\text{смК}}$	$\frac{C_p,}{\text{Дж}} \frac{\text{Дж}}{\text{гК}}$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\frac{R_{th},}{\text{К}} \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$	$\frac{C_{th},}{\text{Дж}} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	$T_{th}$ , мс	$\alpha$ , см <sup>2</sup> /с	$e, \frac{1}{\text{В}_{тс}^2} \frac{\text{В}_{тс}^2}{\text{см}^2} \frac{1}{\text{К}}$
КП7209 (КТ-28, КТ-97В)	0,7	20,2	0,42	1,49	0,7	2,3	0,16	0,016	2,5	0,88	1,56
КП723 (КТ-28)	0,7	32,5	0,46								

Затем экспериментальные образцы подвергались разгерметизации и исследованию качества монтажа кристаллов методом лазерной фотоакустической инспекции, а также с помощью электронной микроскопии. Данные по качеству монтажа кристаллов, полученные с помощью растровой электронной микроскопии и разработанных методик тепловой релаксации хорошо коррелируют между собой.

**Список использованных источников:**

1. А.Н.Петлицкий, А.Ф.Керенцев, Т.В.Петлицкая. Исследование тепловой деградации интерфейсных границ слоя под кристаллами мощных транзисторов // Научно-технический отчет о научно-исследовательской работе: тезисы научно тех. отчет., Минск. – 2010. – С. 14.
2. Методика электротепловой спектроскопии для исследования малых изменений теплового сопротивления полупроводниковых приборов при термоиспытаниях / Ю.А. Бумай, О.С. Васьков, В.К. Кононенко, В.С. Нисс, А.Ф. Керенцев, А.Н. Петлицкий, Я.А. Соловьев // Сборник трудов VII Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники», посвященной 50-летию юбилею кафедры физики полупроводников и наноэлектроники, Минск, 12 — 13 октября 2016 г. / Бел. гос. ун-т. – Минск: БГУ, 2016. – С.34 – 37.
3. Amer S., Ash E. A., Newman V. Photo-displacement imaging// Electron. Letter. 1980, v. 17. № 10.