

Рисунок 2 – Распределение времени релаксации ТРДС спектров в исходных исследуемых образцах

Необходимо также отметить, что использование разностных тепловых спектров после термоударов позволяет оценить эволюцию развития дефектов в слое посадки по сдвигу времени тепловой релаксации, соответствующего этому слою, и возрастанию амплитуды разностных спектров.

#### Литература

1. Бумай, Ю.А. Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов / Ю.А. Бумай

[и др.] // Электроника инфо. – 2010. – № 3. – С. 58–59.

2. Нисс, В.С. Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектрометрии / В.С. Нисс [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256.

3. Zakgeim, A.L. Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types / A.L. Zakgeim [et al.] // EuroSimE 2013: 14th Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. – Wroclaw, 2013. – P. 1/7–7/7.

4. Бумай, Ю.А. Методика электротепловой спектрометрии 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.

УДК 621.382

### АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ СЛОЯ ПОСАДКИ КРИСТАЛЛОВ В МОЩНЫХ МОП ТРАНЗИСТОРАХ ИЗ РАЗНОСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ СПЕКТРОВ ПРИ ТЕРМОШОКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Бумай Ю.А.<sup>1</sup>, Васьков О.С.<sup>1</sup>, Нисс В.С.<sup>1</sup>, Солодуха В.А.<sup>2</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Соловьев Я.А.<sup>2</sup>, Керенцев А.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>ОАО «Интеграл», Минск, Республика Беларусь

При термоиспытаниях полупроводниковых приборов обычно наблюдаются небольшие изменения полного теплового сопротивления, в основном, из-за деградации слоя посадки кристаллов на теплоотводящее основание. В данной работе исследовалась деградация слоя посадки теплового сопротивления мощных транзисторов КП723 и КП7209 в металлокерамическом корпусе КТ-97В после серий термоударов (5 минут при -196°С, 10 минут 200 °С). Монтаж кристаллов транзисторов на корпус осуществлялся на припой ПОС-40. Конструкция корпуса КТ-97В может содержать термокомпенсатор (МД40 или МД50) для снижения термических напряжений в кристалле мощного транзистора.

Измерения и анализ проводились с использованием метода тепловой релаксационной дифференциальной спектрометрии (ТРДС) [1] с построением разностных тепловых спектров. Определялись внутреннее тепловое сопротивление транзисторов и его структура в виде непрерывных дифференциальных спектров исходного образца

(до термоиспытания)  $S_0$  и спектры  $S_T$  после каждого цикла по 100 термоударов. В соответствии с [1] ТРДС спектры первого порядка  $S_0$  и  $S_T$  могут быть представлены суммой производных от тепловых сопротивлений структурных элементов полупроводникового образца.

$$S_0 = \sum_i^n r_{i0} \frac{t}{\tau_{i0}} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_{i0}}\right), \quad (1)$$

где  $r_{i0}$  и  $\tau_{i0}$  – слоевые тепловые сопротивления образца и постоянные времени тепловой релаксации образца до термоиспытаний.

$$S_T = \sum_i^n r_{iT} \frac{t}{\tau_{iT}} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_{iT}}\right), \quad (2)$$

где  $r_{iT}$  и  $\tau_{iT}$  – после термоиспытаний.

Далее для каждого цикла термоиспытаний определяется разностный ТРДС спектр  $S_T = S_T - S_0$ . Поскольку не все тепловые компоненты образца при термоиспытаниях изменяются, разностный спектр  $S_T$  отражает часть спектра  $S_0$  с меняющейся амплитудой. В основном, как выявлено из эксперимента, при термоиспытаниях в транзисторах происходит тепловая деградация

слоя посадки кристалла, остальные компоненты теплового интерфейса образцов подвержены слабым изменениям, следовательно, разностном спектре  $S_r$  остаются компоненты, соответствующие тепловым параметрам слоя посадки до и после термоиспытаний.

$$S_r = r_T \frac{t}{\tau_T} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_T}\right) - r_0 \frac{t}{\tau_0} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_0}\right), \quad (3)$$

где  $r_0$  и  $\tau_0$  – тепловое сопротивление и постоянная времени тепловой релаксации слоя посадки образца до термоиспытаний и  $r_T$ ,  $\tau_T$  – после термоиспытаний.

Из эксперимента получено, что при термоиспытаниях, тепловая релаксация образца соответствуют, в основном, двум вариантам разностных спектров.

1) Время тепловой релаксации после термообработки не изменяется  $\tau_T = \tau_0$ , т.е. отношения сопротивлений и теплоемкостей обратно пропорциональны –  $r_T/r_0 = c_0/c_T$ . В этом случае выражения для  $S_r$  принимает вид

$$S_r = (r_T - r_0) \frac{t}{\tau_0} \exp\left(-\frac{t}{\tau_0} + 1\right), \quad (4)$$

то есть представляет кривую с максимумом, равным  $r_T - r_0$  в точке  $t = \tau_0$ .

Пример такого случая приведен на рисунке 1. Из рисунка 1 видно, что амплитуда максимума разностного спектра соответствует значению  $r_T - r_0$ , а временное положение  $\tau_T = \tau_0$ . Это характерно для разрастания объемных (трехмерных) дефектов в слое посадки кристалла.

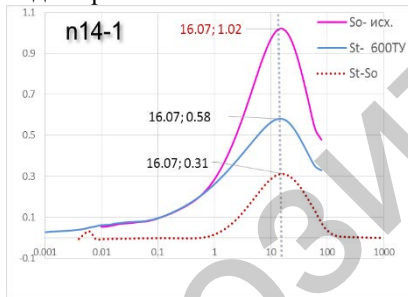


Рисунок 1 – Разностные тепловые спектры при термоиспытаниях транзистора КП7209 (образец n14-1)

2) Тепловое сопротивление и время тепловой релаксации при термообработке изменяются пропорционально т.е.  $r_T/r_0 = \tau_T/\tau_0$ , следовательно, при изменении теплового сопротивления в результате термоиспытаний, теплоемкость слоя не изменяется ( $c_T \approx c_0$ ). Это характерно для разрастания плоских (двумерных) дефектов слоя, например, для отслаивания припоя. В этом случае при  $\tau_T/\tau_0 < 2$ , можно показать, что формула (3) с погрешностью менее 1% может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$S_r = \frac{4}{e} (r_T - r_0) \left(\frac{t}{\tau_T + \tau_0}\right)^2 \exp\left(-\frac{2t}{\tau_T + \tau_0} + 2\right). \quad (4)$$

Пример такого случая приведен на рисунке 2, из которого видно, что для данного образца амплитуда максимума разностного спектра  $S_r$  близка к значению  $r_T - r_0$ , а временное положение – к  $\tau_T + \tau_0$ , что согласуется с выражением (5).

Анализ дефектов слоя посадки проведен с использованием моделей, соответствующих формулам (3, 4). Для идентификации механизмов тепловой релаксации в образцах введем в рассмотрение параметр  $\alpha$ , выбранный в виде отношения суммы времен релаксации спектров образцов до и после термообработки, соответственно, к времени релаксации разностного спектра  $\alpha = 1 + (\tau_0 + \tau_i)/\tau_T$ .

Исходя из определений моделей временной релаксации спектров в зависимостях (3, 4) время релаксации  $\tau_T$  разностных спектров находится в интервале:  $\tau_0 \leq \tau_T \leq \tau_0 + \tau_i$ . Соответственно, параметр  $\alpha$  может принимать значения в интервале 2 ÷ 3. Значение  $\alpha = 2$ , при котором изменения сопротивлений и теплоемкостей обратно пропорциональны ( $r_T/r_0 = c_0/c_T$ ), соответствует двумерной модели дефекта, а  $\alpha = 3$  при котором теплоемкость не изменяется  $c_0 = c_T$ , – трехмерной соответственно.

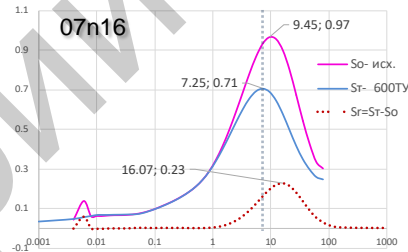


Рисунок 2 – Разностные тепловые спектры транзистора КП7209 (n19-1)

На рисунке 3 приведено распределение  $\alpha$ , используемое для идентификации дефектов при деградации теплового сопротивления мощных транзисторов КП723 и КП7209.

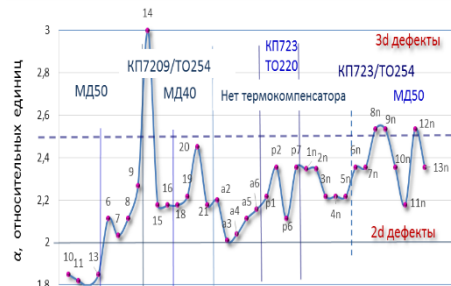


Рисунок 3 – Распределение параметра  $\alpha$  в исследуемых образцах

Из рисунка 3 видно, что в образце 14 доминирует рост при термообработке трехмерных дефектов, которые можно определить, как деградацию структуры припоя, в остальных образцах смешанный тип тепловой релаксации с преобладанием рассеяния на плоских дефектах которые можно идентифицировать как

отслаивание кристалла. В образцах группы КП7209/МД50/Au выявлен заниженный уровень  $\alpha < 2$ , что может быть связано погрешностью измерений, ввиду слабых изменений в  $R_{jc}$  (порядка 0.02K/Вт), для образцов этой группы.

УДК 621.371

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЙЯНИЯ ФАР

Алешкевич Н.Н.<sup>1</sup>, Будаи А.Г.<sup>1</sup>, Кныш В.П.<sup>1</sup>, Малый С.В.<sup>2</sup>, Наумович Н.М.<sup>3</sup>, Юбко А.П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко БГУ

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Антенна является неотъемлемой частью любой приемно-передающей системы, при проектировании которой необходимо учитывать окружающую электромагнитную обстановку. Антенна, подключенная к приемопередатчику, может, как пассивный рассеиватель, иметь эффективную поверхность рассеяния (ЭПР) в десятки и сотни раз больше ее геометрической площади.

Характеристики согласования антенны со свободным пространством и приемно-измерительным трактом паспортизируются в рабочем диапазоне системы, а вне его они обычно неизвестны. ЭПР любой антенной системы, в том числе и фазированной антенной решетки (ФАР), состоит из двух составляющих. Одна, "антенная" составляющая, является следствием приема падающей на антенну электромагнитной волны и последующего ее переизлучения и зависит от коэффициента направленного действия антенны и ее согласования с приемным трактом. Вторая составляющая – чисто конструктивная, зависящая от механической конструкции антенны и используемых материалов. Знание этих характеристик необходимо при проектировании приемно-передающих систем с учетом условий электромагнитной совместимости. Определение же их зачастую проще осуществить экспериментально.

Для проведения экспериментальных исследований разработан специализированный измерительный комплекс, в состав которого входят: безэховая камера на основе широкополосного радиопоглощающего покрытия пирамидального типа «Универсал-1»; радиопоглощающие панели из радиопоглощающего покрытия ГОРА-39; слабоотражающая система пространственной фиксации исследуемых образцов; векторный анализатор Vector Star VS4642B; комплект антенн Пб-23В. Разработана методика проведения измерений образцов. Проведена оценка предельных размеров исследуемых объектов и диапазонов частот.

1. Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии / В.С. Нисс [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256.

Разработанный измерительный комплекс является универсальным и предназначен для проведения антенных измерений, а также анализа эффективной поверхности рассеяния произвольных метало-диэлектрических объектов. С использованием комплекса возможно проведение исследования конечных фрагментов радиопоглощающих покрытий, частотно-селективных и пространственно-поляризационных фильтров.

Ниже приведены результаты экспериментального исследования ЭПР плоского фрагмента ФАР с размерами 40x9 см<sup>2</sup> (Рисунок 1). Здесь и далее для упрощения под термином ЭПР понимается максимальное значение моностатической ЭПР объекта.

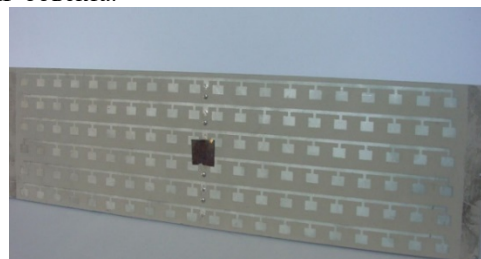


Рисунок 1 – Фрагмент фазированной антенной решетки

Измерение ЭПР антенны проводилось в диапазоне частот 2÷15ГГц.

Для калибровки и оценки точности измерений помимо фрагмента ФАР исследовались ЭПР дополнительных объектов. В качестве объектов исследования были использованы:

- 1) ФАР с согласованной нагрузкой;
- 2) ФАР с разомкнутыми выходами;
- 3) плоская металлическая пластина с площадью, равной площади поверхности ФАР;
- 4) металлический диск диаметром 200мм.

Так как для металлического диска известно точное решение задачи рассеяния, то используемая методика позволяет в результате измерений