

УДК 621.382.3

ДИАГНОСТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ В МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОМ КОРПУСЕ

Сыс А.Д.

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

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – канд.техн.наук, доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Рассмотрены проблемы обеспечения качества и надежности при сборке и монтаже изделий электроники. Проанализированы некоторые методы диагностики, основанные на анализе динамики температурного отклика на импульс нагрева. Показано, что изучение механизмов отказов транзисторов должно осуществляться с учетом не только внутренних физико-химических процессов, происходящих в них, но и всех условий окружающей среды, а также факторов внешних воздействий, которые во многих случаях играют доминирующую роль в развитии тех или иных процессов деградации параметров.

Ключевые слова: мощный транзистор, диагностика, скрытые дефекты, механизм отказов, испытания на циклическое воздействие температуры

Введение. Среди многообразных направлений современной полупроводниковой электроники важное место занимает разработка и производство кремниевых мощных транзисторов. Проблема обеспечения качества и надежности при сборке и монтаже изделий электроники нацеливает на использование эффективных методов диагностики скрытых дефектов. Методы должны обеспечивать высокую информативность контроля, достоверность, возможность автоматизации анализа результатов [1–9].

Основная часть. Для мощных транзисторов очень важно выполнить монтаж кристаллов с минимумом дефектов в соединительном слое под кристаллом, так как это позволяет предотвратить тепловой перегрев и существенную деградацию тепловых и механических свойств на стадии эксплуатации. При этом важно знать не только численные значения величин, составляющих тепловую модель мощного транзистора, но и уметь сопоставить их с конкретными частями изготавливаемого изделия. Во многих случаях это поможет выявить причины брака или иных технологических проблем.

В последнее время разработаны новые методы диагностики, основанные на анализе динамики температурного отклика на импульс нагрева. Динамические методы дают возможность получить гораздо больше информации о тепловых характеристиках в виде электротепловой модели, а также позволяют «увидеть» пространственное расположение элементов тепловой модели. В данной работе опробован новый динамический метод – метод релаксационной дифференциальной спектроскопии тепловых процессов, который обладает высокой точностью и позволяет идентифицировать субмикронные интерфейсные границы полупроводник-металл неразрушающим методом.

Следует подчеркнуть, что изучение механизмов отказов транзисторов должно осуществляться с учетом не только внутренних физико-химических процессов, происходящих в них, но и всех условий окружающей среды, а также факторов внешних воздействий, которые во многих случаях играют доминирующую роль в развитии тех или иных процессов деградации параметров. Расширение диапазона применения полупроводниковых приборов обуславливает более жесткие требования по механическим вибрационным и ударным воздействиям, широкому температурному диапазону их работы, радиационной стойкости, работе при повышенной влажности, приводящей к коррозионным отказам и т.д.

Испытания полупроводниковых приборов на циклическое воздействие температуры. Некоторые несовершенства конструкции и нарушения технологии при изготовлении мощных транзисторов могут проявляться при испытаниях, как при повышенных, так и при пониженных температурах. При повышенных температурах ускоряется диффузия примесей и

зарядов на поверхности полупроводника, увеличивается подвижность ионов в оксиде, повышается влаго- и газоотделение частями изделия, ускоряется процесс старения сплавов, лучше выявляются механические напряжения. При пониженных температурах появляется воздействие термических напряжений на спаи и на *p-n*-переходы активной структуры.

Для изделий силовой электроники свойственны следующие особенности [1, 7–9]:

- статические и динамические потери ведут к росту температуры;
- колебания температуры в форме активных и пассивных тепловых циклов вызывают механические напряжения, ограничивающие срок службы изделия.

В то время как временные масштабы коротких тепловых циклов исчисляются секундами, длинные тепловые циклы связаны с более длительными интервалами времени. Хотя эти два эффекта запускают разные механизмы отказа, оба они характеризуются циклическими колебаниями температуры и максимальной достигаемой температурой.

Прогнозировать срок службы конкретной конструкции лучше всего на основании точного профиля нагрузки. Чтобы достоверно рассчитать температуру изделия и амплитуду ее циклических колебаний, по которым можно дать надежный прогноз срока службы изделия, необходимо знать динамику изменения тока нагрузки, условия охлаждения и особенности конкретного полупроводникового силового компонента. Для потребителей мощных транзисторов очень важно иметь изделия с длительным сроком эксплуатации и в тоже время с большой плотностью мощности. Однако, чем выше плотность мощности, тем выше рабочая температура изделия, что приводит к росту механических напряжений в элементах конструкции корпуса, отличающихся коэффициентом термического линейного расширения (ТКЛР). Термические напряжения способствуют ускоренным отказам изделия в экстремальных условиях эксплуатации. Несмотря на определенный прогресс в технологиях силовой электроники, способствующий продлению срока службы компонентов, управление тепловыми режимами за счет оптимального выбора конструктивного исполнения становится все более важным для получения максимальной отдачи от этих современных устройств.

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 минус 196 до +200°C 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 τ . Дифференциальный спектр определяется на основе производных высшего порядка динамического теплового импеданса и соответствует модели Фостера, а дискретный – модели Кауера [9]. 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, разработанного в БНТУ.

Рассмотрено исследование деградации внутреннего теплового сопротивления транзисторов на примере мощных транзисторов КП7209, КП723 и их импортных аналогов, для вариантов исполнения в различных корпусах при термошоковом воздействии. Выполнен сравнительный анализ результатов изменения сопротивления R_{jc} усредненного для различных групп образцов. На рисунке 1 представлены зависимости теплового сопротивления, при

термошоковом воздействии для мощных экспериментальных ДМОП транзисторов типа КП7209 и КП723, в разном конструктивном исполнении.

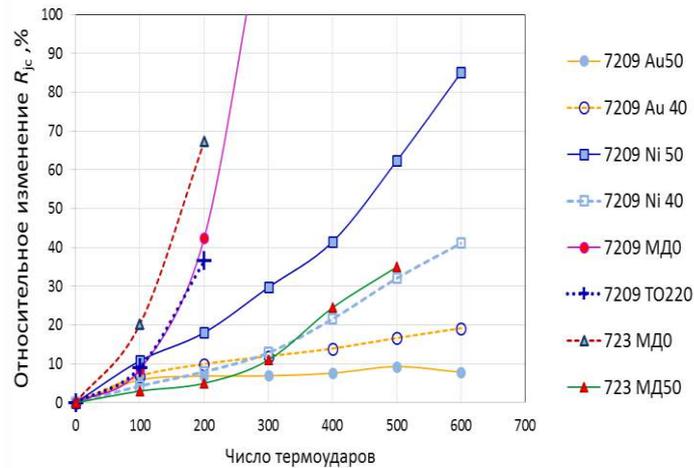


Рисунок 1 – Относительные изменения теплового сопротивления транзисторов КП7209 и КП723 при термошоковом воздействии

Видно, что в транзисторах без термокомпенсатора (МД0) существенная, 10% и более, деградация теплового сопротивления наблюдается уже после воздействия 100 термоударов. Наименьший уровень изменения теплового сопротивления наблюдается в транзисторах КП7209 с посадкой кристалла на AuSi эвтектику, на рисунке 1 обозначены как Au50, Au40

Для транзисторов КП7209 выявлена зависимость между уровнем внутреннего теплового сопротивления образцов и типом термокомпенсатора. Так транзисторы с термокомпенсатором MD40 Ni40 и Au40 представленные на рисунке 2 имеют значительно больший уровень исходного R_{jc} , чем с термокомпенсатором MD50 (Ni50 и Au50). В тоже время, как видно из рисунка 2, образцы с посадкой кристалла на припой Ni40 в меньшей степени подвержены деградации, чем Ni50.

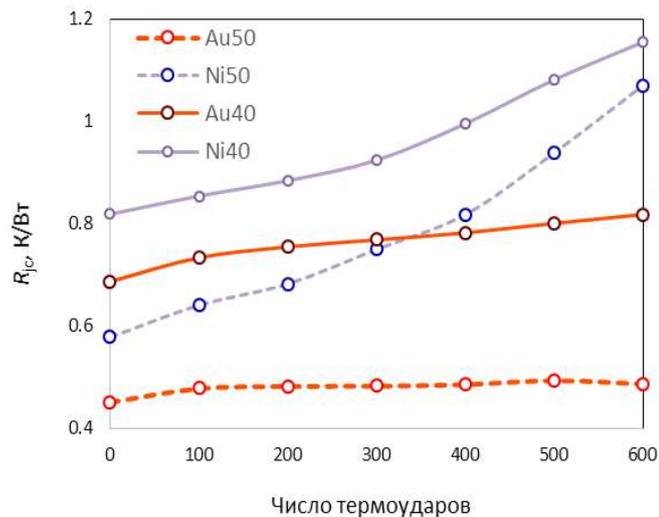


Рисунок 2 – Абсолютные изменения теплового сопротивления для транзисторов типа КП7209 при термошоковом воздействии

Следует отметить, что в транзисторах КП7128 в корпусе КТ-28 без термокомпенсатора монотонного изменения сопротивления R_{jc} не выявлено вплоть до воздействия 500 термоударов.

Заключение. Комплекс работ по исследованию структуры теплового сопротивления интерфейсных границ под кристаллами мощных ДМОП транзисторов КП7209, КП723 до и после циклического высокоинтенсивного воздействия температуры внешней среды от минус 196 °С до +200 °С. Анализ структуры теплового сопротивления исследуемых образцов выполнен неразрушающим методом релаксационной спектроскопии с временным разрешением 1 мкс на основе переходных электрических процессов. Установлено, что в многослойных структурах наблюдается несовершенство интерфейсных слоев под кристаллом.

Список литературы

1. Анализ дефектов слоя посадки кристаллов в мощных МОП транзисторах из разностных тепловых спектров при термошоковом воздействии / Ю. А. Бумай [и др.] // *Приборостроение - 2017 : материалы 10-й Международной научно-технической конференции, 1-3 ноября 2017 года, Минск, Республика Беларусь / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]*. - Минск : БНТУ, 2017. - С. 305-307.
2. Алексеев, В. Ф. Математическое моделирование как средство оптимизации параметров силовых интегральных микросхем / В. Ф. Алексеев, А. Д. Сыс, Г. А. Пискун // *Interdisciplinary research: scientific horizons and perspectives : II International Scientific and Theoretical Conference, Vilnius, October 1, 2021 / European Scientific Platform*. - Vilnius, 2021. - P. 109-113. - DOI : <https://doi.org/10.36074/scientia-01.10.2021>.
3. Алексеев, В. Ф. Обзор методов компьютерного проектирования силовых интегральных микросхем в условиях воздействия электростатического разряда / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, А. Д. Сыс // *Interdisciplinary research: scientific horizons and perspectives : II International Scientific and Theoretical Conference, Vilnius, October 1, 2021 / European Scientific Platform*. - Vilnius, 2021. - P. 114-116. - DOI : <https://doi.org/10.36074/scientia-01.10.2021>.
4. Алексеев, В. Ф. Построение алгоритма трехмерного моделирования тепловой нестационарности в системе токоведущих элементов силовых микросхем при воздействии контактного разряда статического электричества / Алексеев В. Ф., Пискун Г. А., Сыс А. Д. // *Современные средства связи : материалы XXVI Международной научно-технической конференции, Минск, 21 октября 2021 г. / Белорусская государственная академия связи*. - Минск, 2021. - С. 44-45.
5. Сыс, А. Д. Тенденции развития технологий корпусирования силовых микросхем / А. Д. Сыс // *Новые информационные технологии в научных исследованиях (NiT-2021) : материалы XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 15-17 декабря 2021 г. / Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина*. - Рязань, 2021. - С. 147-149.
6. Сыс, А. Д. Тенденция уменьшения шага выводов корпуса микросхем / А. Д. Сыс // *Новые информационные технологии в научных исследованиях (NiT-2021) : материалы XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 15-17 декабря 2021 г. / Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина*. - Рязань, 2021. - С. 150-152.
7. Корреляционный анализ методов неразрушающего контроля / С. С. Волкентейн [и др.] // *Приборостроение-2015 : материалы 8-й международной научно-технической конференции, Минск, 25-27 ноября 2015 г. : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]*. - Минск, 2015. - Т. 1. - С. 188-190.
8. Методика на основе метода электротепловой спектроскопии для исследования профилей растекания теплового потока в оптоэлектронных и силовых полупроводниковых приборах / Ю. А. Бумай [и др.] // *Приборостроение-2016 : материалы 9-й международной научно-технической конференции, Минск, 23-25 ноября 2016 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]*. - Минск, 2016. - С. 155-157.
9. Нисс, В. С. и др. Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии = Estimation of thermal parameters of power bipolar transistors by the method of thermal relaxation differential spectrometry / В. С. Нисс, О. С. Васьков, А. С. Турцевич, А. Ф. Керенцев, В. К. Кононенко // *Приборы и методы измерений : научно-технический журнал*. - 2015. - Т. 6, № 2. - С. 249-256.

UDC 621.382.3

DIAGNOSTICS OF SEMICONDUCTOR PRODUCTS IN CERAMIC BODY

Sys A.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexeev V.F. – PhD, assistant professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The problems of quality assurance and reliability in the assembly and installation of electronic products are considered. Some diagnostic methods based on the analysis of the dynamics of the temperature response to a heating pulse are analyzed. It is shown that the study of the failure mechanisms of transistors should be carried out taking into account not only the internal physicochemical processes occurring in them, but also all environmental conditions, as well as external factors that in many cases play a dominant role in the development of certain degradation processes. parameters.

Keywords: power transistor, diagnostics, hidden defects, failure mechanism, temperature cycling tests