

увеличивается в несколько раз. В процессе исследований отмечалось, что наибольшая механическая прочность достигается в составах, в которых содержится отход глазури ОАО «Керамин», это объясняется тем, что в процессе синтеза, наряду с активным формированием стекловидной фазы (основу которой составляют оксиды SiO_2 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O), присутствуют огнеупорные компоненты, такие как: Al_2O_3 , ZrO_2 , способствующие повышению указанной характеристики за счет особенностей своего строения, а также специфических свойств.

При рассмотрении фотографии поверхности образца, обожженного при 900°C , отчетливо видно, что большая часть оксида железа (III) перешла в расплав, который отчетливо выделяется на поверхности керамического покрытия. Можно наблюдать незначительное количество кварцевой составляющей – скопления кристаллов, наличие которых подтверждается данными РФА.

Исследование поверхности образца, обожженного при 1000°C свидетельствует, о том, что количество расплава в материале несколько увеличивается при повышении температуры, также отмечается, что содержание зерен кварца снижается, а его форма становится более округлой. Материал характеризуется однородной текстурой.

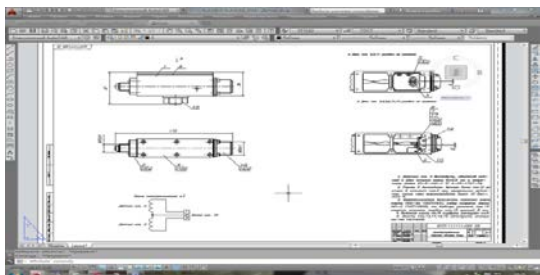


Рисунок 2 – Фазовый состав покрытий

Фазовый состав покрытий характеризуется наличием корунда, α -кварца, кремния, периклаза. Кроме того, в некоторых составах образцов покрытий фиксировался муллит.

Образцы оптимального состава обладали следующими характеристиками: твердость по шкале Мооса – 8,5; прочность при сжатии – 71,09 МПа; водопоглощение – 24,49 %; открытая пористость – 34,66 %; ТКЛР – $6,14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

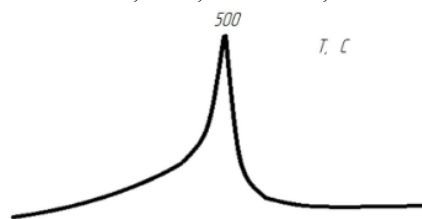


Рисунок 3 – Температура начала воспламенения защитного покрытия

Отмечается, что температура инициализации процесса самовоспламенения в оптимальном составе, согласно данным дифференциально-термического анализа, составляет $500 - 510^\circ\text{C}$.

1. Мержанов, А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / А.Г. Мержанов. – Москва: Химия, 1983. – 144 с.
2. Петюшик, Е.Е. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / Е.Е. Петюшик, В.Е. Романенков, С.М. Ушеренко. – Минск: МИПК при БГПА, 2000. – 66 с.
3. Мержанов, А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез туго-плавких неорганических соединений / А.Г. Мержанов, И.П. Боровинская. – М.: Химия, 1984. – 402 с.
4. Мержанов, А.Г. Концепция развития самораспространяющегося высокотемпературного синтеза как области научно-технического прогресса / А.Г. Мержанов, А.М. Столин. – Москва: ИСМАН, 2003. – 367 с.

УДК 621.382

ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРОВ ТЕПЛОвого СОПРОТИВЛЕНИЯ МОЩНЫХ МОП ТРАНЗИСТОРОВ КП723 И КП7209 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕРМОУДАРОВ

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

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «Интеграл»

Минск, Республика Беларусь

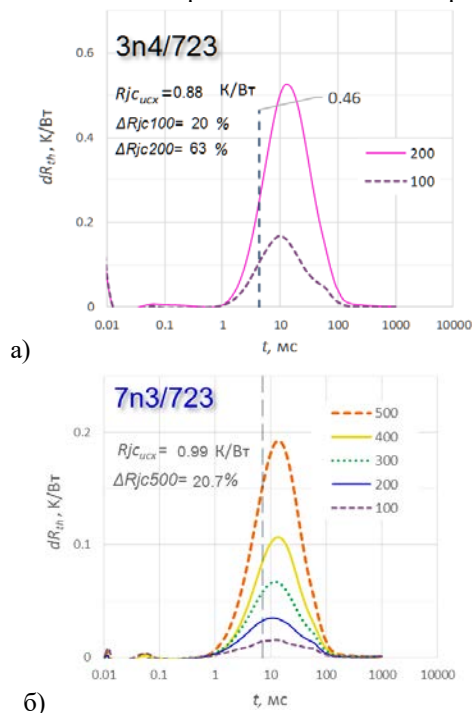
С использованием релаксационного импеданс-спектрометра [1] тепловых процессов проведены тепловые измерения двух партий экспериментальных мощных полевых транзисторов и КП723 (n-МОП) и КП7209 (p-МОП) в пластмассовом ТО220 и металлокерамическом ТО254 корпусах, соответственно. Транзисторы изготовлены с

использованием различных методов посадки кристаллов (на эвтектику AuSi и на припой ПОС-10 при разных температурах), а также с использованием термокомпенсаторов MD-40 и MD-50 для снижения термических напряжений в кристаллах транзисторов. Дegrадация теплового сопротивления транзисторов и его структуры исследовалась

при воздействии серии термоударов: $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (5 минут), $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (10 минут). Методом тепловой релаксационной дифференциальной спектрометрии (ТРДС) [2, 3] получены дифференциальные тепловые спектры транзисторов (зависимости динамического теплового сопротивления и производных высоких порядков от него от времени). На основе ТРДС спектров построены разностные спектры ТРДС, полученные вычитанием из спектров после термоударов спектров исходных образцов. Данная методика позволяет обнаружить малые изменения в структуре теплового сопротивления исследуемых транзисторов (до $0,01\text{ К/Вт}$) [4].

В качестве примера на рисунке 1 приведены изменения при термоиспытаниях разностных спектров теплового сопротивления транзисторов КП723.

Установлено, что для всех исследованных образцов временное положение максимума разностных спектров находится в интервале 3–15 мс. Из анализа ТРДС спектров исследуемых транзисторов можно сделать вывод, что такой временной интервал соответствует слою посадки кристалла с различного типа дефектами (плоскими и объемными – кавернами и отслоениями припоя).



а) без термокомпенсатора,
 б) с термокомпенсатором МД50.

Рисунок 1 – Разностные спектры транзисторов КП723/ТО254 с посадкой кристалла на припой после серий по 100 термоударов. Вертикальной линией представлены положение по шкале времени и величина теплового сопротивления слоя посадки в ТРДС спектре исходного образца

Анализ показывает, что после термоударов произошел монотонный рост внутреннего теплового сопротивления R_{jc} , обусловленный ростом теплового сопротивления слоя посадки, практически во всех исследованных транзисторах КП723 и КП7209. Определено, что в исследованных образцах экспериментальных транзисторов КП723 в корпусе ТО254, с посадкой кристалла на припой и термокомпенсатором МД50 произошли меньшие изменения (в среднем рост 35 % после 500 термоударов) теплового сопротивления при термоиспытаниях по сравнению с транзисторами КП7209 аналогичного конструктивного исполнения. Анализ профиля растекания тепла в кристаллах, исследованных образцов показывает, что транзисторы КП723 в отличие от КП7209 имеют существенно больший коэффициент заполнения кристалла (число электрически активных транзисторных ячеек) и, соответственно, большую величину активной площади S_a в поверхностном слое кристалла КП723. В зоне ближе к границе с припоем ($t \approx 1\text{ мс}$) в кристаллах КП723 сечение теплового потока сужается из-за теплового барьера, возникающего на дефектах припоя.

Во всех исследованных транзисторах КП7209 в корпусе ТО254 после воздействия термоударов наблюдалась последовательная деградация теплового сопротивления. Наименьший рост 3–6 % после 600 термоударов зафиксирован в транзисторах КП7209 в корпусе ТО254 с термокомпенсатором МД50 с посадкой кристалла на эвтектику AuSi. В то же время подобные транзисторы, но с термокомпенсатором МД40, показали худшие результаты, как по уровню исходного теплового сопротивления, так и его роста. Образцы с термокомпенсатором выдержали без отказа 500–600, а без термокомпенсатора 100–200 термоударов.

Анализируя временное положение пика (время тепловой релаксации τ_0), соответствующего области посадки, исходных ТРДС спектров транзисторов (на рисунках 1а б вертикальные штриховые линии), можно оценить глубину залегания дефектов в слое припоя. Чем больше времени тепловой релаксации τ_0 , тем дальше от границы кристалл-припой находится дефект посадки. На рисунке 2 приведены данные для постоянных времени релаксации τ_0 спектров исследованных образцов.

Из рисунка видно, что только для образцов транзисторов с термокомпенсатором МД40 как с посадкой кристалла на припой, так и на эвтектику, время релаксации τ_0 составляет более 10 мс. Таким образом, в исходных образцах с термокомпенсатором МД40 доминируют глубокие дефекты в переходной области слоя посадки с термокомпенсатором, в остальных образцах, в том числе с термокомпенсатором МД50 – вблизи границы с кристаллом.

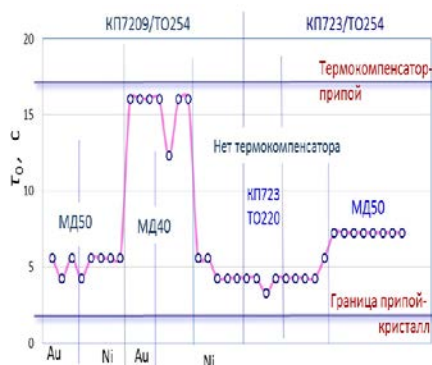


Рисунок 2 – Распределение времени релаксации ТРДС спектров в исходных исследуемых образцах

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.¹, Васьков О.С.¹, Нисс В.С.¹, Солодуха В.А.², Петлицкий А.Н.², Соловьев Я.А.², Керенцев А.Ф.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «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°C, 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 τ_{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 τ_{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