

Особенности сборки транзисторов в корпусе D-Pak

Анатолий КЕРЕНЦЕВ
akerentsev@transistor.com.by

Владимир ЛАНИН
vlanin@bsuir.unibel.by

Авторы статьи, имея многолетний опыт в области сборки и монтажа изделий электроники, разрабатывают новые автоматизированные процессы монтажа кристаллов транзисторов вибрационной пайкой в защитной атмосфере. Для того чтобы гарантировать требуемую устойчивость мощных транзисторов, выполненных в корпусе D-Pak, к условиям поверхностного монтажа, необходимо обеспечить высокое качество посадки кристаллов на кристаллоноситель. Создан оптимальный вариант конструктивно-технологического исполнения транзисторов в корпусе D-Pak, отличающийся стабильностью и воспроизводимостью тепловых параметров. Представленная информация будет полезна специалистам, работающим в области сборки изделий электроники.

Особенности корпуса D-Pak

При сборке транзисторов в пластмассовом корпусе D-Pak для поверхностного монтажа с повышенной мощностью рассеивания (discrete power device package) применяют посадку кристалла с помощью припойной прокладки. Для обеспечения заданной мощности $P_{\max} \leq 45$ Вт и низкого переходного теплового сопротивления $p-n$ -переход-корпус в качестве кристаллодержателя и теплоотвода применяют медные сплавы с теплопроводностью не хуже 350 Вт/м·°С [1]. Однако использование в составе корпуса транзистора материалов, не совместимых по величине коэффициента теплового линейного расширения (КТЛР), приводит к необходимости ограничения тепловых воздействий в процессе монтажа, что и отражается в технических условиях на изделия. Различные технологии пайки поверхностного монтажа — волновая, ИК-нагревом — в паровой фазе связаны с интенсивным нагревом тонкого пластмассового корпуса. При высоких тепловых нагрузках возникает опасность растрескивания корпуса и кристалла, возможность последующего проникновения влаги внутрь корпуса и деградации характеристик транзистора [2].

Корпуса транзисторов для поверхностного монтажа (D-Pak) относятся к XIV группе по ГОСТ 20.39.405-84, и к ним предъявляются жесткие требования по воздействию режимов пайки и паяемости выводов:

1. Конструкция изделий должна обеспечивать трехкратное воздействие групповой пайки и лужения выводов горячим способом без теплоотвода при температуре пайки не выше 265 °С в течение 4 с.

2. Изделия должны выдерживать групповую пайку одноразовым погружением корпуса в расплавленный припой (волну припоя) при температуре до 265 °С в течение до 4 с.

3. Выводы и контактные площадки изделий должны иметь гарантированную паяемость с использованием спиртоканифольных неактивированных и некоррозионных слабоактивированных флюсов.

Методы монтажа кристаллов на выводные рамки — пайкой эвтектическими сплавами или легкоплавкими припоями, приклеиванием, посадкой на токопроводящую композицию — должны обеспечить высокую прочность соединений при термоциклировании и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений.

Если кристаллы приборов имеют значительную мощность рассеивания (более $0,5$ Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки. Для тех приборов, в которых мощность рассеивания кристалла невелика, а электрическое сопротивление между подложкой кристалла и рамкой незначительно влияет на работу прибора, кристалл приклеивают на токопроводящую композицию [3].

Помимо технологических трудностей посадка кристалла на эвтектические сплавы (высокие температуры, золотое покрытие) имеет и другие недостатки. Ввиду малой пластичности эвтектики Au-Si и разницы в коэффици-

ентах термического расширения кристалла и рамки в напаянном кристалле возникают значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов при пайке, последующих технологических операциях и механических испытаниях, а также к снижению надежности приборов.

Внутренние напряжения, возникающие в процессе присоединения кристалла к подложке, определяются не только физическими параметрами соединяемых материалов, температурой процесса, но и соотношением толщины кристалла к толщине подложки. Напряжения сжатия на поверхности кристалла рассчитывались как [4]:

$$\delta_{\max 1} = -E_1(\alpha_1 - \alpha_2) \times \Delta t \times \times (n)[1 - M_1 + (1 - M_2)(h_1)] + (1 - M_2)n, \quad (1)$$

а напряжения растяжения:

$$\delta_{\max 2} = -E_1(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta t F(h_1/h_2), \quad (2)$$

где E — модуль упругости кремния, α_1 , α_2 — КТЛР кремния и кристаллодержателя, Δt — перегрев кристалла, F — функция, зависящая от соотношения и толщины кристалла h_1 и кристаллодержателя h_2 .

Расчеты показали, что при монтаже кремниевых кристаллов на основание из медного сплава возникают внутренние напряжения, которые могут превышать допустимый уровень напряжения изгиба кремния (250 МПа), в результате чего возникают микротрещины в кристалле. Выбор оптимальной толщины кристалла в пределах 200 – 250 мкм при $h_1/h_2 = 0,4$ – $0,5$ позволяет уменьшить возникающие деформации (рис. 1).

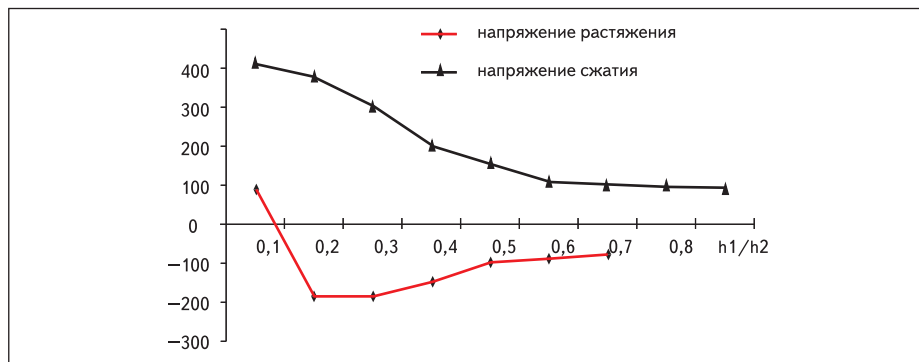


Рис. 1. Механические напряжения в кристалле

Для установления влияния различия КТЛР кремниевого кристалла и кристаллодержателя из медного сплава БрХ исследовались транзисторные структуры размером $2,7 \times 2,7 \times 0,3$ мм с напыленной на непланарную сторону системой металлизации Ti-Ni-Sn-PbSn-Sn. Оптимальное соотношение компонентов системы металлизации и припоя выбрано с учетом температуры присоединения внутренних проволочных соединений методом термозвуковой сварки золотой проволокой при 250°C . Этому условию в соответствии с диаграммой состояния Pb-Sn отвечает композиция, содержащая 85% свинца. Трехслойная композиция Sn-SnPb-Sn выбрана как наиболее эффективная система, обеспечивающая смачивание припоем поверхности никеля на непланарной стороне кристалла и серебра на кристаллодержателе. Толщина слоя олова составляет 2 мкм со стороны никеля и 1 мкм на наружной поверхности. Расчетное значение толщины свинца:

$$h_2 = \frac{A \times \gamma_1 \times h_1}{(100 - A) \times \gamma_2}, \quad (3)$$

где h_1, h_2 — толщина слоя Sn и Pb соответственно; γ_1, γ_2 — уд. вес Sn и Pb соответственно; A — требуемое содержание Pb в припое.

Уменьшение толщины слоя Sn до 2 мкм приводит к снижению толщины слоя Pb до 7,2 мкм, таким образом, варьирование толщиной слоев Sn в пределах 2–3 мкм и Pb в пределах 7,2–10,8 мкм позволило получить припойную композицию с температурой плавления $250\text{--}270^\circ\text{C}$. С учетом допуска $\pm 0,5$ мкм толщина Sn составила: 1-й слой — 1,5 мкм, 2-й слой — 0,5 мкм, толщина слоя Pb — 7,2–10,8 мкм, а общая толщина припоя 9,2–13,8 мкм.

Исследовано влияние конструктивных и технологических факторов (толщина паяного соединения кристалл-кристаллодержатель; наличие демпфера между кристаллом и пластмассовой частью корпуса в виде эластичного компаунда; режимы зачистки обложки на теплоотводящей поверхности кристаллодержателя) на устойчивость транзисторов с $P_{\max} = 30$ Вт в корпусе D-Пак к значительным температурным ударам, возникающим в процессе поверхностного монтажа.

Монтаж кристаллов вибрационной пайкой

Металлизация Ti-Ni осаждалась в установке 01НИ-7-015 непрерывного действия с магнетронной системой распыления. Использованы мишени из никеля марки Н-0 по ГОСТ 849-70, титана ВТ1-0 толщиной листа 6–10 мм по ГОСТ 22178-78. Режимы напыления: давление в камере не более $6,7 \times 10^{-5}$ Па; ток нагрева 3,5 А; мощность магнетрона напыления титана 2 кВт; напыления никеля 3 кВт; скорость конвейера 100 мм/мин.

После формирования системы Ti-Ni осаждалась припойная композиция в установке электронно-лучевого испарения в вакууме «Оратория-9» в последовательности Sn-PbSn-Sn при следующих режимах: температура напыления 280°C ; напряжение 6 кВ; ток эмиссии 0,5 А; время напыления Sn₁: 120–240 с; PbSn: 400–600 с; Sn₂: 120–240 с.

Изготовленные таким образом транзисторные структуры поступали на сборку после соответствующего контроля по электрическим параметрам и внешнему виду. Для сборки транзисторов применялась выводная рамка из материала БрХ с полосой серебра толщиной 7 ± 1 мкм. Монтаж транзисторных структур на легкоплавкую припойную композицию выполнялся на автомате ЭМ4085-03 при следующих технологических режимах: температура $300\text{--}400^\circ\text{C}$; амплитуда колебаний кристалла 25–200 мкм; количество периодов колебаний 2–10 [5].

Качество монтажа кристаллов определялось по внешнему виду до и после воздействия разрушающей нагрузки, прикладываемой перпендикулярно боковой поверхности кристалла. При этом пайка считалась удовлетворительной, если разрушение произошло по кремнию и не менее чем 80% площади кристалла занято кремнием [6]. Это требование подтверждалось и результатами контроля переходного теплового сопротивления p - n -переход-корпус ($R_{\text{ТПК}}$), выполненного с использованием специального зондового устройства.

Активация процесса монтажа кристаллов за счет принудительного вибрационного воздействия при амплитудах 25–50 мкм не ока-

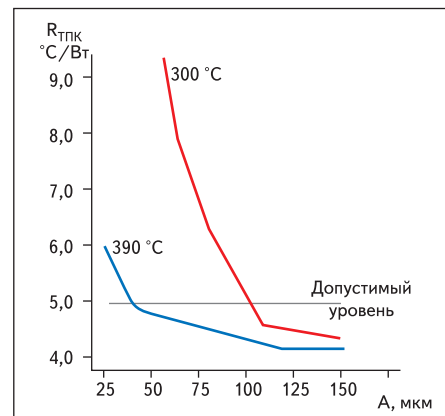


Рис. 2. Влияние режимов монтажа кристаллов на уровень теплового сопротивления

зывает положительного результата. Это вызвано тем, что при малых амплитудах вибрации, в условиях выполнения процесса монтажа без применения защитной атмосферы не происходит полного удаления окислов из зоны монтажа и образуются участки с непропаями, приводящими к росту теплового сопротивления. Это особенно заметно в случае пайки кристаллов при температурах до 300°C (рис. 2). Увеличение температуры монтажа кристаллов до 390°C , а амплитуды колебаний до 75–150 мкм способствует эффективному удалению окислов из зоны монтажа, при этом исключаются пустоты и непропаи под кристаллом, что и позволяет получить требуемый уровень переходного теплового сопротивления. Это имеет существенное значение для мощных транзисторов.

Монтаж кристаллов на легкоплавкий припой вибрационной пайкой на автомате ЭМ4085 приводит к гомогенизации паяного соединения, исключению дефектов в виде пустот и непропаев. В результате снижается уровень термомеханических напряжений в активной структуре, уменьшается переходное теплое сопротивление, повышается производительность монтажа [7].

При сборке транзисторов опробован вариант с увеличенной толщиной паяного соединения за счет использования дополнительной прокладки припоя ПОС-10 толщиной 50 мкм. Нанесение эластичного демпфирующего слоя компаунда СИЭЛ 159-322Б на поверхность кристалла после формирования проволочных перемычек выполнялось на автомате ЭМ4085 с применением стандартного дозатора. После выполнения каждой технологической операции проводился контроль кристаллов по внешнему виду на наличие трещин.

После герметизации на рамках осуществлялось удаление перемычек микрофрезой и освобождение эмиттерного и базового выводов от связующей крошки рамки, с последующим контролем ВАХ каждого прибора после каждой операции. В результате последовательного операционного анализа установлено, что трещины в кристалле возникают

в процессе герметизации. Анализ характерного расположения трещин на кристалле (рис. 3) указывает на то, что растрескивание кристаллов происходит при герметизации в процессе смыкания пресс-формы на отдельных гнездах матрицы из-за несоответствия величины перепада на формованной части рамки и матрицы пресс-формы. При глубине формовки коллекторного вывода $1 \pm 0,07$ мм на рамке фактическое несоответствие глубины перепада на элементах матрицы пресс-формы достигает $\Delta_{\text{max}} = 0,25$ мм. Это приводит к тому, что в процессе смыкания верхней и нижней частей пресс-формы происходит деформация плоскости кристаллодержателя и пластическая деформация зоны пайки кристалла с последующим образованием трещины в кристалле.

Трещины в кристалле отсутствовали для вариантов сборки транзисторов с защитой кристалла эластичным демпфирующим слоем и с дополнительным демпфирующим слоем припоя. В обоих вариантах в результате уменьшения глубины перепада на элементах пресс-формы происходит снижение внутренних напряжений в кристалле и устраняются трещины в нем.

При герметизации корпуса пластмассой на теплоотводе образуется облой повышенной

толщины, достигающей 40–50 мкм. Это создает значительные трудности по его удалению шлифовальным кругом на плоско-шлифовальном станке и может являться причиной возникновения дополнительных механических напряжений в кристалле. В процессе зачистки облоя необходимо исключать возможность грубого заглабления шлифовального круга в материал выводной рамки. В этом случае происходит перегрев кристаллодержателя, что заметно по изменению его цвета, а механическая деформация поверхностного слоя, передаваемая в кристалл, приводит к возникновению механических напряжений, способных привести к его растрескиванию. Неоднократные эксперименты при различных режимах зачистки облоя шлифовальным кругом показали высокую эффективность применения дополнительно защитного эластичного компаунда, наносимого на поверхность кристалла.

В результате совершенствования конструктивно-технологического исполнения приборов и доработки пресс-форм были изготовлены контрольные партии приборов с последующим испытанием в условиях поверхностного монтажа на плату: полное погружение в припой при температуре 260 ± 5 °С в течение 10 с. Гистограмма распределения приборов с различным конструктивно-технологическим исполнением по отказам в условиях поверхностного монтажа приведена на рис. 4.

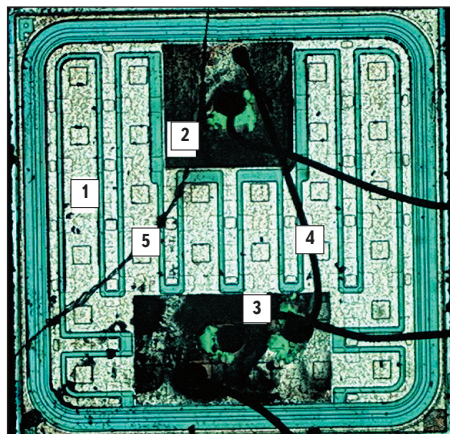


Рис. 3. Внешний вид кристалла:
1 — кристалл; 2, 3 — контактные площадки;
4 — проволочное соединение; 5 — трещина

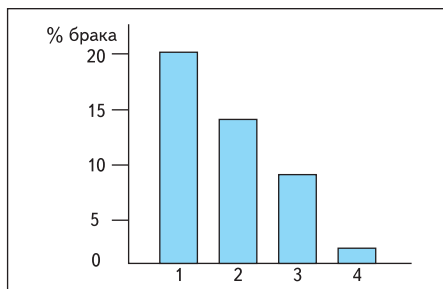


Рис. 4. Гистограмма распределения приборов по отказам:

- 1 — малая толщина паяного соединения (≤ 5 мкм);
2 — на пресс-форме несоответствие глубины формовки 0,25 мм;
3 — защита компаундом отсутствует;
4 — оптимальный вариант

Для оптимального варианта конструктивно-технологического исполнения приборов брак не превышает 2%.

Заключение

Предложен оптимальный вариант конструктивно-технологического исполнения мощных транзисторов в корпусе D-Pak, предназначенных для поверхностного монтажа (толщина паяного соединения не менее 8 мкм, посадка кристалла на легкоплавкий припой вибрационной пайкой, защита кристалла эластичным компаундом, глубина формовки в пределах не хуже $\pm 0,07$ мм) и обладающих высокой надежностью в условиях температурных воздействий процессов групповой пайки.

Литература

- Advanced Electronic Packaging / Ed. by R.K. Ulrich, W.d. Brown. N.Y.: Wiley Interscience. 2006.
- Taraseiskey H. Power Hybrid Circuit Design and Manufacture. N.Y.: Marcel Dekker Inc. 1996.
- Whitaker J.C. Microelectronics. N.Y.: CRC. 2006.
- Omi S., Fujita K. Causes of cracks in SMD and type specific remedies // IEEE Trans.Comp. Hybrid, Manufacture Technology. 1991. № 14.
- Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л., Иваш А.М. Автоматизированный монтаж кристаллов мощных транзисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2000. № 4.
- Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Статистическое регулирование процесса монтажа кристаллов мощных транзисторов // Электроника и электротехника. Каунас: Технология. 2000. № 3 (26).
- Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Электрические и тепловые параметры контактов при монтаже кристаллов в приборах силовой электроники // Электроника и электротехника. Каунас: Технология. 2002. № 1 (36).
- Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Повышение устойчивости транзисторов в корпусе D-Pak к поверхностному монтажу // Электроника и электротехника. Каунас: Технология. 2003. № 7 (49).