

Сборка мощных бескорпусных MOSFET-транзисторов

для поверхностного монтажа

Исследованы способы сборки мощных бескорпусных MOSFET-транзисторов, предназначенных для поверхностного монтажа электронных модулей силовой электроники.

Владимир Ланин, д. т. н., профессор

vlanin@bsuir.by

Анатолий Керенцев

akerentsev@transistor.com.by

Варианты технологий поверхностного монтажа

В настоящее время поверхностный монтаж электронных компонентов на платы — одно из перспективных направлений сборки блоков РЭА, к которым предъявляются требования миниатюрности и невосприимчивости к низкочастотной вибрации. В технологии поверхностного монтажа выделяют два основных направления [1]: монтаж в плоских корпусах с планарным расположением выводов на печатной плате (Surface Mount Technology, SMT) и совмещенный монтаж корпусированных и бескорпусных кристаллов на плате (Chip on Board, COB). В первом случае в качестве активных электронных компонентов широко применяются транзисторы в пластмассовых корпусах типа SOT-23, SOT-223, D-Pak, D2-Pak (SMD-220). Перспективны в этом случае и изделия в герметичных металлокерамических корпусах типа SMD-0,5, SMD-1, SMD-2, которые позволяют осуществлять дальнейшую микроминиатюризацию, уменьшение веса при высокой рассеиваемой мощности и сохранение герметичности после длительных термоциклических нагрузок [2].

Технология совмещенного монтажа корпусированных и бескорпусных кристаллов, а также монтажа бескорпусного кристалла на коммутационной плате (Chip-and-Wire Technology, CWT) использует проводное соединение непосредственно прикрепленного к плате кристалла с печатными проводниками платы. Электрические соединения выполняются проводниками из золота или алюминия ультразвуковой сваркой. Занимаемая кристаллами область заливает-

ся эпоксидной смолой. Преимущества по сравнению с технологией поверхностного монтажа: компактность (за счет экономии места) и экономичность (нет пластикового корпуса).

Выбор типа корпуса зависит от мощности, рассеиваемой прибором, и реального размера полупроводникового кристалла. SOT-23 применяют для корпусирования кристаллов площадью до 1,0 мм² и рассеиваемой мощностью до 500 мВт, SOT-89 рассчитан на кристаллы площадью 3,0 мм² и мощность до 1 Вт, а корпуса типа SMD — 150 Вт [3]. Транзисторные корпуса имеют простую конструкцию с тремя выводами: у SOT-23 центральный вывод расположен с одной стороны корпуса, а два других вывода — с другой, в то время как у SOT-89 они находятся по одну и ту же сторону корпуса, а центральный вывод имеет увеличенный размер для лучшего отвода тепла (рис. 1). Корпус типа SOT герметизируют методом литьевого прессования с применением пресс-материала (например, ST7100DSA — Корея, MG-40F — Германия), а SMD-05-(2) — шовной роликовой сваркой.

Корпуса SOT-23 и SOT-89 относятся к XIV группе, к которым согласно ГОСТ 20.39.405-84 предъявляются жесткие требования по технологическим воздействиям:

1. Конструкция изделий должна обеспечивать трехкратное воздействие групповой пайки и лужения выводов горячим способом без применения теплоотвода и соединение при температуре групповой пайки не выше 265 °С в течение до 4 с.
2. Выводы и контактные площадки изделий должны иметь гарантированную паяемость с использованием спирто-канифольных неактивированных и слабоактивированных флюсов (не более 25% канифоли) без дополнительной подготовки в течение 12 месяцев с момента изготовления.
3. Изделия должны выдерживать трехкратный нагрев по режиму: температура не выше 150 °С, длительность однократного воздействия — не более 10 мин.
4. Конструкция изделий должна обеспечивать применение групповых методов пайки. Оплавление припойной пасты проводят при следующих режимах: нагрев до температуры 190 °С не более 30 с; последующий нагрев до температуры не выше 230 °С не бо-

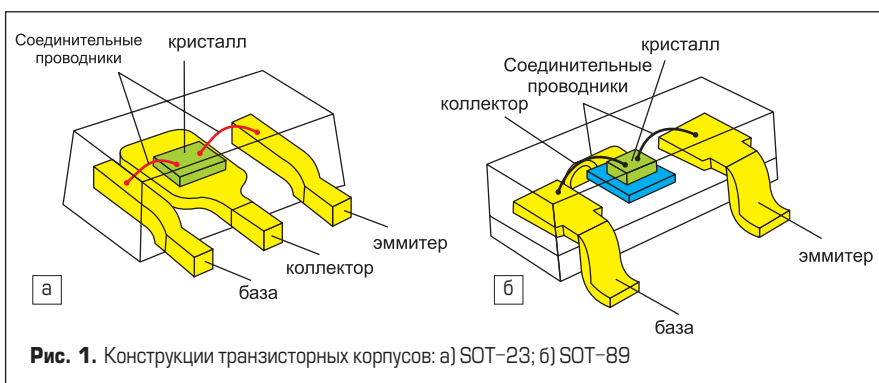


Рис. 1. Конструкции транзисторных корпусов: а) SOT-23; б) SOT-89

лее 15 с; нагрев групповым паяльником при температуре пайки не выше 265 °С не более 4 с. Для обеспечения максимальной мощности в качестве материала выводной рамки используют железо-никелевый сплав 42Н и медный сплав БрХСр, с толщиной кристаллодержателя 0,1 мм. На поверхность рамки наносят полосу серебра шириной 9 мм и толщиной 5 мкм. Так как сплав БрХСр обладает высоким уровнем ТКЛР ($18 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, что в 6 раз выше Si), то в процессе пайки в кремниевом кристалле возникают механические напряжения и деформации. Для снижения внутренних напряжений необходимо правильно выбрать припой и оптимизировать технологические режимы монтажа, позволяющие уменьшить градиент температур, действующих на кристалл. На непланируемую поверхность кристаллов наносят систему металлизации: Ti-Au, V-Au толщиной 1,0–1,75 мкм — для монтажа на эвтектику; Ti-NiV-Ag-Sn-Pb-Sn толщиной 5,0–12,0 мкм — для монтажа на припой.

Исследовано влияние способа сборки мощных MOSFET-транзисторов в двух вариантах бескорпусного исполнения: 1 — на металлическом кристаллодержателе без внешних выводов (рис. 2а); 2 — на металлокерамическом или керамическом держателе с внешними выводами (рис. 2б) на уровень их предельных параметров.

Выбор технологии сборки кристаллов

При изготовлении приборов по первому варианту исполнения присоединение кристалла к молибденовому кристаллодержателю осуществляли методом контактно-реактивной эвтектической пайки с образованием эвтектики Au-Si при использовании дополнительной золотой прокладки размером 4,0×4,0×0,016 мм. Для сравнения напайка кристаллов проводилась на двух установках: ручной типа ЭМ-415 и автоматической типа ЭМ-4085. Монтаж кристаллов на установке ЭМ-415 вели при следующих режимах $T = 420...450 \text{ }^\circ\text{C}$, максимальная вибрация вдоль короткой стороны кристалла, время воздействия вибрации — 10 с, давление на инструмент — 0,40–1,10 Н, подогрев инструмента — до 250 °С. Для обеспечения плоскостности торца инструмента с поверхностью кристаллодержателя проводилась регулировка с последующей проверкой качества отпечатка инструмента на алюминиевой фольге. После настройки отпечаток торца инструмента имел оттиск равной контрастности по четырем сторонам.

В процессе монтажа было выявлено влияние технологических режимов на качество присоединения кристаллов. Так, при увеличении нагрузки на инструмент до 1,10 Н происходит резкое затухание амплитуды колебаний присоединяемого кристалла, что способствует формированию дефектов в эвтектическом слое в виде несплошностей и пустот. Наличие таких дефектов для мощных приборов недопустимо, так как в процессе эксплуатации будет происходить перегрев активной структуры. Поэтому напайка кристаллов проводилась при давлении на инструмент в пределах

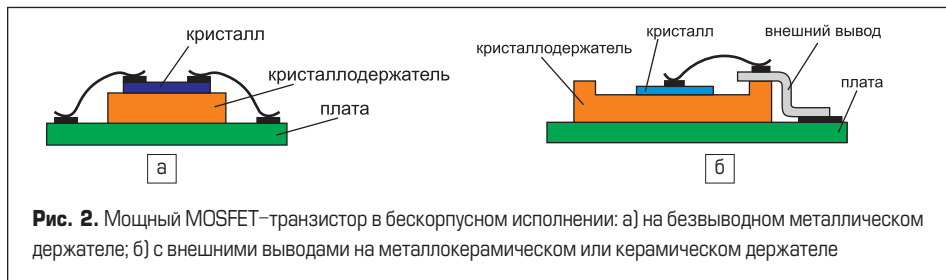


Рис. 2. Мощный MOSFET-транзистор в бескорпусном исполнении: а) на безвыводном металлическом держателе; б) с внешними выводами на металлокерамическом или керамическом держателе

0,40–0,45 Н, при котором еще осуществляют колебательные движения кристалла.

Установлено влияние температуры процесса. При 420 °С отмечалось недостаточное растекание эвтектики по периметру кристалла. Формирование эвтектики с требуемым уровнем качества получено при температуре 430...450 °С. Для эффективного образования эвтектики требовалось проведение дополнительной активации процесса путем колебания столика вручную на начальной стадии образования эвтектики, причем кристалл удерживается в положении пайки в течение всего времени воздействия вибрации инструмента. Монтаж кристаллов на автомате ЭМ-4085 повышает эффективность образования эвтектики Au-Si за счет активации процесса присоединения в результате принудительного движения кристаллов по криволинейной замкнутой траектории, обеспечиваемой программируемыми параметрами вибрации [4]. При амплитуде колебаний кристалла более 250 мкм за 8–10 периодов колебаний происходит эффективное удаление оксидных пленок и шлаков за пределы активной зоны, при этом обеспечивается равномерная толщина эвтектики в соединении. Кристаллодержатель фиксируется в ленточной кассете с помощью трех фиксаторов, выступающих над поверхностью кассеты и располагаемых по периметру отверстия. Для повышения эффективности автоматического процесса присоединения кристаллов и быстрого прогрева соединяемых деталей была доработана конструкция нагревательного столика установки в части введения дополнительных вторяющихся выступов диаметром 7,5 мм и высотой до 1,5 мм. Пайка проводилась при следующих режимах: температура $T = 450\text{--}460 \text{ }^\circ\text{C}$; количество периодов колебаний — 12; амплитуда двухкоординатных колебаний по осям X, Y — 250–500 мкм; пауза — 70; усилие нагружения — 1,45 Н.

При изготовлении приборов по второму варианту исполнения присоединение кристалла к кристаллодержателю осуществляли пайкой легкоплавким припоем ПОС-10 в конвейерной водородной печи ЖК4007А при $T_{\text{макс}} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_k = 80 \text{ мм/мин}$ с использованием кассетной технологии сборки. Данный метод образования паяного соединения, являясь пассивным, характеризуется повышенным дефектообразованием в виде пустот и непропаев под кристаллом [3]. Поэтому с целью снижения дефектности в паяном соединении на кристаллодержатель из псевдосплава MD-40 предварительно наносилось покрытие хим. НЗ,Зл,2, а на непланируемую поверхность кристалла — металлизация Ti-NiV-Ag. Указанные покрытия обеспечивали эффективное смачивание расплавом припоя, как поверхности

кристалла, так и кристаллодержателя. При пайке к кристаллу прикладывалась статическая нагрузка.

Разварка межсоединений осуществлялась на установке АВТ-2 проволокой АОЦПоМ250А по следующей схеме: затвор — 1 перемычка, исток — 3 перемычки. Проведены операции термовыдержки ($T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 24 \text{ ч}$) и защиты кристалла компаундом СИЭЛ159-322Б. Присоединение керамической крышки к металлокерамическому держателю осуществляли клеем ВТ10.

Исследование качества монтажа кристаллов

Исследование качества монтажа кристаллов осуществлялось методом оптического контроля внешнего вида с использованием МБС-10 при $\times 16\text{--}32$ и ММУ-3 при $\times 50\text{--}100$. Установлено, что присоединение кристаллов по первому и второму вариантам исполнения в оптимальных режимах позволяет получить ровное растекание эвтектики/припоя со всех четырех сторон кристалла без пор и непропаев. В отдельных случаях для первого варианта исполнения выявлены утяжки эвтектики из-за имеющихся микросколов в нижней грани кристалла, которые возникли в процессе дисковой резки пластины на кристаллы. В целом качество присоединения кристаллов соответствует требованиям нормативных документов. Прочность крепления кристаллов проверяли путем воздействия сдвигающей нагрузки, создаваемой динамометром 7800-6380-03. При нагрузке 30 Н разрушения кристаллов не происходило.

Для исследования качества соединений использованы следующие диагностические методы анализа:

- рентгенотелевизионное диагностирование внутренних микродефектов (несплошностей, пористости, неоднородностей, инородных включений и т. д.) в паяном соединении;
- лазерная микроинтерферометрия и фотоакустическая диагностика качества монтажа и оценки напряженно-деформированного состояния кристаллов.

Результаты анализа регистрировались при помощи цифровой фотокамеры НР912 с экранов мониторов аналитических приборов: рентгенотелевизионного микроскопа МТР-7, лазерного фотоакустического микроскопа ФМ-3М и лазерного микроинтерферометра.

Для приборов первого варианта исполнения методом рентгенотелевизионной дефектоскопии явных несплошностей в эвтектике под кристаллом не обнаружено. Выявлены отдельные неоднородности в виде разноконтрастных участков проекции рентгеновского теневого

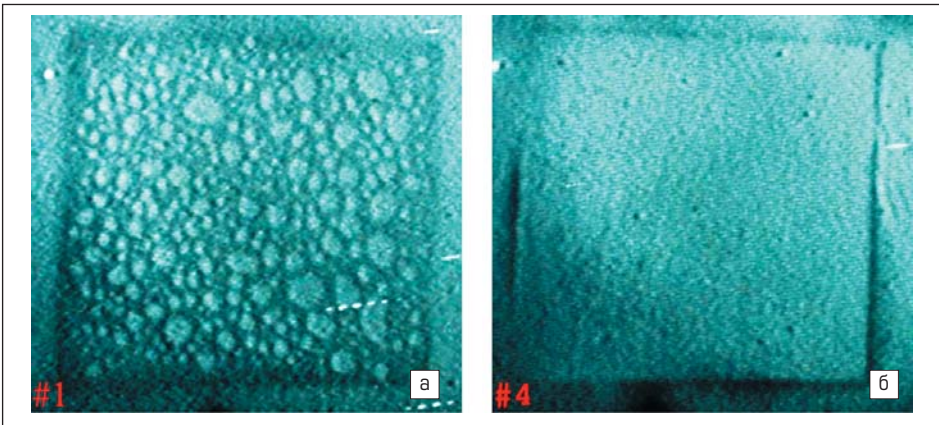


Рис. 3. Рентгенограмма паяного соединения под кристаллом: а) пайка через прокладку припой в конвейерной печи; б) эвтектическая пайка и двухкоординатное перемещение на ЭМ-4085

изображения Au прокладки, частично прореагировавшей по толщине в пределах 60% площади кристалла в связи с неполным растворением прокладки, что обусловлено режимом однокоординатного перемещения кристалла в процессе монтажа. Для приборов второго варианта исполнения в паяном соединении выявлены локальные несплошности, имеющие линейный размер до 10 мкм (рис. 3а).

Двухкоординатное перемещение кристаллов относительно подложки по замкнутому контуру в процессе монтажа на автомате ЭМ-4085 является оптимальным способом присоединения кристаллов больших размеров. В этом случае дефектов в паяном соединении не выявлено (рис. 3б). Методом лазерной микроинтерферометрии определен уровень напряженно-деформированного состояния кристаллов, который составляет 60–72 МПа для первого варианта исполнения и 28–45 МПа — для второго варианта исполнения.

Предельные параметры транзисторов

Контроль статических параметров проводился на измерителе «Гамма 153-04М». Измерения теплового сопротивления «р-п-переход-корпус» $R_{тнк}$ выполнены на СИС-24. Измерение параметров приборов первого варианта исполнения осуществлялось на зондовой установке, подключенной к измерителю. Для проверки предельных параметров — R_p , $I_{сmax}$, $R_{си}$ — изготовленных транзисторов проводилась выборочная сборка в условную микросхему в корпусе ТО-3. Для этого использовалась ножка, на фланце которой отсутствует медный держатель, а внешние выводы выполнены

из материала МК (медь-ковар). Дискретный кристаллодержатель с напаянным кристаллом приклеивался на поверхность фланца ножки с помощью изолирующего компаунда типа ЭПП-91. Использование изолирующего компаунда позволило уменьшить влияние корпуса ТО-3 при измерении предельных параметров. После сушки компаунда выполнялась разварка выводов проволокой АОЦПоМ по следующей схеме: затвор — 1 перемычка (проволока 150 мкм), исток — 2 перемычки (проволока 250 мкм) и кристаллодержатель – фланец ножки — 2 перемычки (проволока 250 мкм).

При испытаниях по определению предельной мощности приборы размещались на медном водоохлаждаемом теплоотводе, обеспечивающем $T_{корп} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ при токе $I_c = 10\text{ A}$ и $U_{си} = V_{ар}$. Результаты контроля предельных параметров представлены в таблице.

Как следует из таблицы, максимальная мощность транзисторов бескорпусного исполнения фактически составляет 100–150 Вт при условии монтажа кристаллов на металлический кристаллоноситель. Сопротивление $R_{си}$ в цепи сток-исток находится в допустимых пределах, величина которого определяется используемым типом кристалла и кристаллоносителя.

При эксплуатации бескорпусной транзистор на плате подвергается циклическому воздействию электрической мощности, вызывающей периодический нагрев кристалла, кристаллодержателя и паяного соединения. Из-за различия в коэффициентах термического линейного расширения (КТЛР) кристалла, припоя и подложки в паяном шве возникает деформация сдвига γ , определяемая выражением [5]:

$$\gamma = \frac{L}{h_u} \times \left[\frac{L}{B\rho} - \Delta\alpha(T - T_0) \right], \quad (1)$$

где

$$B = \frac{6 \frac{L}{h} (1+m)^2}{3(1+m)^2 + (1+my)(m^2 + m^{-1}y^{-1})}. \quad (2)$$

Здесь h — общая толщина соединения (кристаллодержателя, паяного шва и платы); L — расстояние от центра паяного соединения до максимально удаленной точки галтели паяного шва; ρ — радиус кривизны; $m = h_n/h_k$, где h_n, h_k — толщина платы и кристаллодержателя; $y = E_n/E_k$, где E_n, E_k — модули упругости платы и кристаллодержателя; T, T_0 — температура в процессе испытания и до испытания соответственно

В условиях воздействия энергоциклов и возникающего градиента температур существенно возрастает деформация сдвига для несогласованных по КТЛР спаев, что вызывает снижение термоусталостного ресурса, появление межзеренного растрескивания и образование пустот в легкоплавком припое [6]. Эти причины приводят к росту переходного теплового сопротивления и последующему перегреву кристалла, что вызывает деградацию прибора. На рис. 4 показано изменение уровня теплового сопротивления при воздействии термоударов –60...+200 °С.

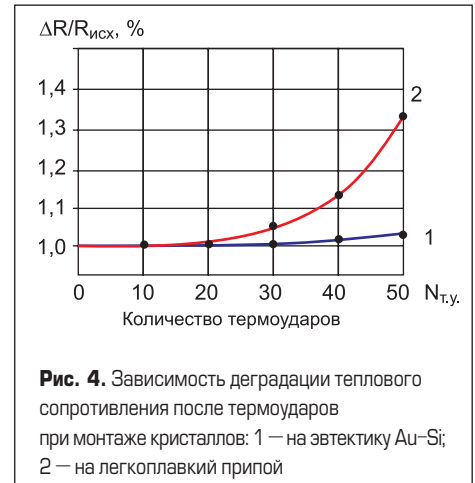


Рис. 4. Зависимость деградации теплового сопротивления после термоударов при монтаже кристаллов: 1 — на эвтектику Au-Si; 2 — на легкоплавкий припой

В процессе испытаний не выявлено изменения уровня теплового сопротивления в пределах погрешности измерения для приборов, монтаж кристаллов которых выполнен контактно-реактивной пайкой. В то же время приборы, у которых кристалл напаян на легкоплавкий припой ПОС-10, имеют положительную динамику изменения теплового сопротивления.

Выводы

Разработана конструкция бескорпусных мощных MOSFET-транзисторов двух исполнений:

- 1 — на безвыводном молибденовом кристаллодержателе;
- 2 — с внешними выводами на металлокерамическом держателе (изолированный)

Таблица. Параметры мощных MOSFET-транзисторов

Тип кристалла	Вариант исполнения	$R_{тнк}$, °C/Вт	$R_{си}$, МОм	$I_{сmax}$, А	Предельная мощность $P_{сmax}$, Вт
КП771А-6	1 вариант (эвтектика Au-Si, пайка на ЭМ-415)	1,45 ($U_{си} = 10\text{ В}, I_c = 15\text{ А}$)	40 ($I_c = 20\text{ А}, U_{зи} = 10\text{ В}$)	39	95
КП771А-6,	1 вариант (эвтектика Au-Si, пайка на ЭМ-4085)	1,4 ($U_{си} = 10\text{ В}, I_c = 15\text{ А}$)	40 ($I_c = 20\text{ А}, U_{зи} = 10\text{ В}$)	41	100
КП723А	2 вариант (кристаллодержатель керамический, пайка на припой)	1,8 ($U_{си} = 10\text{ В}, I_c = 10\text{ А}$)	32 ($I_c = 31\text{ А}, U_{зи} = 10\text{ В}$)	66	80
КП723А	2 вариант (кристаллодержатель из сплава MD-40, пайка на припой)	1,0 ($U_{си} = 10\text{ В}, I_c = 10\text{ А}$)	26,0 ($I_c = 31\text{ А}, U_{зи} = 10\text{ В}$)	75	150

кристаллодержатель из керамики ВК-94 либо металлический из сплава MD-40).

Анализ экспериментальных результатов показывает, что монтаж кристаллов на эвтектику Au-Si позволяет значительно повысить устойчивость мощных транзисторов к циклическому изменению температуры. Для получения качественного присоединения монтаж кристаллов необходимо выполнять на оборудовании, обеспечивающем вибрационную пайку с двухкоординатным перемещением кристалла.

Литература

1. Кундас С. П., Достанко А. П., Ануфриев Л. П. Технология поверхностного монтажа. Минск: Армита — Маркетинг, Менеджмент, 2000.
2. Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Конструктивно-технологические особенности MOSFET-транзисторов // Силовая электроника. 2008. № 1.
3. Рубцевич И. И., Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф. Исследование MOSFET-транзисторов в различных герметичных корпусах для поверхностного монтажа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 5.
4. Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Автоматизированный монтаж кристаллов транзисторов вибрационной пайкой // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 3.
5. Цыкин А. В., Яковлев Г. А. Повышение надежности несогласованных микрополосковых плат с корпусами СВЧ-модулей при циклических температурных воздействиях. Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Вып. 12 (1476). М.: ЦНИИ «Электроника», 1989.
6. Кузин А. Г., Лучков Е. Н., Рыбалов Е. И. Малоцикловая термоусталость паяных соединений микроэлектронных компонентов при поверхностном монтаже // Обзоры по электронной технике. Сер. 10. Вып. 1 (1335). М.: ЦНИИ «Электроника», 1988.