

Д. Л. АНУФРИЕВ, И. И. РУБЦЕВИЧ, А. Ф. КЕРЕНЦЕВ

Республика Беларусь, г. Минск, Завод "Транзистор"
E-mail: AKerentsev@transistor.com.byДата поступления в редакцию
15.11.2005 г.Оппонент к. ф.-м. н. С. Д. ВОТОРОПИН
(НИИПП, г. Томск)

ПОВЕРХНОСТНЫЙ МОНТАЖ МОЩНЫХ БЕСКОРПУСНЫХ MOSFET-ТРАНЗИСТОРОВ

Разработаны конструкции бескорпусных мощных MOSFET-транзисторов на безвыводном кристаллодержателе и кристаллодержателе с внешними выводами для эффективного поверхностного монтажа.

В настоящее время метод поверхностного монтажа электронных компонентов на платы является одним 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]:

а) технология монтажа в плоских корпусах с планарным расположением выводов на печатной плате (Surface Mount Technology — SMT). При этом в качестве активных электронных компонентов наиболее широко используются транзисторы в пластмассовых корпусах типа SOT-23, SOT-223, D-Pak, D²-Pak (SMD-220). Перспективными в этом случае являются изделия в герметичных металлокерамических корпусах типа SMD-0,5, -1, -2, которые позволяют осуществлять дальнейшую микроминиатюризацию, уменьшение массы при обеспечении высокой рассеиваемой мощности и сохранении герметичности после длительных термоциклических нагрузок [2];

б) технология совмещенного монтажа кристаллов в корпусе и без него (Chip on Board — COB), а также

монтажа кристалла на коммутационной плате (Chip-and-Wire Technology — CWT), который подразумевает проводное соединение непосредственно приложенного к плате кристалла с печатными проводниками платы. Электрические соединения выполняются проводниками из золота или алюминия методом ультразвуковой сварки. Занимаемая ими область заливается эпоксидной смолой. Преимущества по сравнению с технологией поверхностного монтажа SMT — компактность (за счет экономии места) и экономичность (т. к. нет пластикового корпуса).

В данной работе представлены результаты исследования влияния способа монтажа кристаллов на уровень параметров мощного MOSFET-транзистора различных конструкций:

— вариант 1 — транзистор в бескорпусном исполнении на металлическом кристаллодержателе без внешних выводов (см. рис. 1, а);

— вариант 2 — транзистор в бескорпусном исполнении на металлокерамическом или керамическом держателе с внешними выводами (рис. 1, б).

Сборка приборов

При изготовлении приборов по 1-му варианту исполнения присоединение кристалла к молибденовому кристаллодержателю осуществлялось методом контактно-реактивной эвтектической пайки с образованием эвтектики Au-Si и использованием дополнительной золотой прокладки размерами 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 осуществлялся в следующих режимах: температура $T=420...450^{\circ}\text{C}$, максимальная вибрация вдоль короткой стороны кристалла, время воздействия вибрации 10 с, давление на инструмент 0,40—1,10 Н, подогрев инструмента до 250°C (цвет спирали красный). Для обеспечения плоскостности торца инструмента с поверхностью кристаллодержателя проводилась регулировка с последующей проверкой качества отпечатка инструмента на алюминиевой фоль-



Рис. 1. Мощный MOSFET-транзистор в бескорпусном исполнении:

а — на безвыводном металлическом держателе; б — с внешними выводами на металло-керамическом или керамическом держателе

ге. После настройки рабочего инструмента (иглы) отпечаток ее торца по контрастности должен быть равномерным по площади).

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 в эвтектическом слое дефектов в виде неоднородностей и пустот. Наличие таких дефектов для мощных приборов недопустимо, т. к. в процессе эксплуатации будет происходить перегрев активной структуры. Поэтому напайка кристаллов проводилась при давлении на инструмент в пределах 0,40—0,45 Н, при котором еще осуществляются колебательные движения кристалла. Также установлено влияние температуры процесса — при 420°C отмечалось недостаточное растекание эвтектики по периметру кристалла. Формирование эвтектики с требуемым уровнем качества получено при температуре 430—450°C. Для эффективного образования эвтектики требовалось проведение дополнительной активации процесса путем колебания столика вручную на начальной стадии образования эвтектики, при этом в течение всего времени воздействия вибрации инструмента кристалл удерживался в положении пайки.

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. При амплитуде колебаний кристалла более 250 мкм за 8—10 периодов колебаний происходит эффективное удаление окисных пленок и шлаков за пределы активной зоны, обеспечивая равномерную толщину эвтектики в соединении. Кристаллодержатель фиксировался 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 повторяющихся выступов диаметром 7,5 мм и высотой до 1,5 мм. Напайка проводилась в следующих режимах: температура 450—460°C, количество периодов колебаний — 12, амплитуда двухкоординатных колебаний по осям X, Y — 250—500 мкм, пауза — 70, давление — 1,45 Н.

При изготовлении приборов по 2-му варианту исполнения присоединение кристалла к кристаллодержателю осуществлялось методом пайки легкоплавким припоем ПОС-10 в конвейерной водородной печи ЖК4007А при $T_{\text{макс}} = 400^\circ\text{C}$, скорости движения ленты 80 мм/мин с использованием групповой технологии сборки. Такой метод образования паяного соединения, являясь пассивным, характеризуется повышенным дефектообразованием в виде пустот и дефектов из-за неравномерности слоя припоя под кристаллом [3]. Поэтому с целью снижения дефектности в пая-

ном соединении на кристаллодержатель из псевдосплава MD-40 предварительно наносилось покрытие хим. НЗ, Зл.2, а на неплазмируемую поверхность кристалла наносилась металлизация Ti-NiV-Ag. Указанные покрытия обеспечивали эффективное смачивание расплавом припоя поверхности как кристалла, так и кристаллодержателя. В процессе пайки к кристаллу прикладывалась статическая нагрузка.

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

Качество монтажа кристаллов

Проверка качества напайки осуществлялась методом оптического контроля внешнего вида с использованием МБС-10 при кратности увеличения 16—32 и ММУ-3 при кратности увеличения 50—100. Установлено, что присоединение кристаллов по 1-му и 2-му вариантам исполнения в оптимальных режимах позволяет получить ровное растекание эвтектики/припоя со всех четырех сторон кристалла без пор и непропаев. В отдельных случаях для 1-го 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 проверялась путем воздействия сдвигающей нагрузки, создаваемой динамометром 7800-6380-03. При нагрузке 3 Н разрушения кристаллов не происходило.

В процессе исследования качества монтажа кристаллов были использованы следующие диагностические методы анализа:

а) метод рентгенотелевизионного диагностирования внутренних микродефектов (несплошностей, пористости, неоднородностей, инородных включений и т. д.) в паяном соединении;

б) метод лазерной микроинтерферометрии и фотоакустической диагностики 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, лазерного микроинтерферометра.

Для приборов 1-го варианта исполнения при контроле методом рентгенотелевизионной дефектоскопии явных несплошностей в эвтектике под кристаллом не обнаружено, но выявлены неоднородности в виде разноконтрастных участков проекции рентгеновского теневого 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 мон-



Рис. 2. Рентгенограмма паяного соединения под кристаллом:

а — эвтектическая пайка, однокоординатное перемещение на ЭМ-415; б — эвтектическая пайка, двухкоординатное перемещение на ЭМ-4085; в — пайка через прокладку припоя в конвейерной печи

тажа (рис. 2, а). Это указывает на неэффективность метода однокоординатного перемещения кристалла относительно подложки.

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. 2, б). Для приборов 2-го варианта исполнения в паяном соединении выявлены локальные несплошности, имеющие линейный размер до 10 мкм (рис. 2, в). Методом лазерной микроинтерферометрии определен уровень напряженно-деформированного состояния кристаллов, который составляет 60—72 МПа для 1-го варианта исполнения и 28—45 МПа для 2-го варианта исполнения.

Предельные параметры транзисторов

Контроль статических параметров проводился на измерителе «Гамма 153-04М». Измерения теплового сопротивления «р-п-переход — корпус» $R_{\text{тпк}}$ выполнены на измерителе СИС-24. Измерение параметров приборов (вариант 1) осуществлялось на зондовой установке, подключенной к измерителю.

Для проверки предельных параметров изготовленных транзисторов — теплового сопротивления $R_{\text{р}}$, максимального тока стока $I_{\text{с max}}$, сопротивления в цепи «сток—исток» $R_{\text{си}}$ проводилась выборочная сборка в условную микросхему в корпусе ТО-3. Для этого использовалась ножка ПАЯ3.551.031, на фланце которой отсутствует медный держатель, а внешние выводы изготовлены из материала МК (медь—ковар). Дисковый кристаллодержатель с напаянным кристаллом приклеивался на поверхность фланца ножки с помощью изолирующего компаунда типа ЭП-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 — одна перемычка (проволока 150 мкм), исток — две перемычки (проволока 250 мкм) и кристаллодержатель-фланец ножки — две перемычки (проволока 250 мкм).

При проведении испытаний по определению предельной мощности $P_{\text{с max}}$ приборы размещались на медном теплоотводе с принудительным охлаждением проточной водой, обеспечивающем температуру корпуса 25°C при токе $I_{\text{с}}=10$ А и напряжении в цепи «сток—исток» $U_{\text{си}}=V_{\text{ар}}$. Результаты контроля предельных параметров представлены в таблице.

Тип кристалла	Вариант исполнения	$R_{\text{тпк}}, ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$R_{\text{си}}, \text{мОм}$	$I_{\text{с max}}, \text{А}$	Предельная мощность $P_{\text{с max}}, \text{Вт}$
КП1771А-6	1-й вариант (эвтектика Au-Si, пайка на ЭМ-415)	1,45 ($U_{\text{си}}=10$ В, $I_{\text{с}}=15$ А)	40 ($I_{\text{с}}=20$ А, $U_{\text{си}}=10$ В)	39	95130
КП1771А-6	1-й вариант (эвтектика Au-Si, пайка на автомате ЭМ-4085)	1,4 ($U_{\text{си}}=10$ В, $I_{\text{с}}=15$ А)	40 ($I_{\text{с}}=20$ А, $U_{\text{си}}=10$ В)	41	100
КП723А	2-й вариант (кристаллодержатель керамический, пайка в печи)	1,8 ($U_{\text{си}}=10$ В, $I_{\text{с}}=10$ А)	32 ($I_{\text{с}}=31$ А, $U_{\text{си}}=10$ В)	66	80
КП723А	2-й вариант (кристаллодержатель из сплава MD-40, пайка в печи)	1,0 ($U_{\text{си}}=10$ В, $I_{\text{с}}=10$ А)	26 ($I_{\text{с}}=31$ А, $U_{\text{си}}=10$ В)	75	150

Как следует из таблицы, максимальная мощность транзисторов бескорпусного исполнения фактически составляет 100—150 Вт при условии монтажа кристаллов на металлический кристаллодержатель. Сопротивление $R_{\text{си}}$ в цепи «сток—исток» находится в допустимых пределах, определяемых используемым типом кристалла и кристаллодержателя.

В процессе эксплуатации бескорпусной транзистор на плате подвергается циклическому воздействию электрической мощности, вызывающей периодический нагрев кристалла, кристаллодержателя и паяного соединения. При этом из-за различия в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) кристалла, припоя и подложки в паяном шве возникает деформация сдвига γ [4], определяемая выражением

$$\gamma = \frac{L}{h_{\text{ш}}} \left[\frac{L}{Br} - \Delta\alpha(T - T_0) \right],$$

где L — расстояние от центра паяного соединения до максимально удаленной точки галтели паяного шва;

h — общая толщина соединения (толщина кристаллодержателя $h_{\text{к}}$, паяного шва $h_{\text{ш}}$ и платы $h_{\text{п}}$);

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

$$m = h_{\text{п}}/h_{\text{к}};$$

$h_{\text{п}}/h_{\text{к}}$ — толщины платы и кристаллодержателя, соответственно;

$$y = E_{\text{п}}/E_{\text{к}};$$

$E_{\text{п}}, E_{\text{к}}$ — модули упругости платы и кристаллодержателя, соответственно;

r — радиус кривизны;

$\Delta\alpha$ — разность ТКЛР платы и кристаллодержателя;

T, T_0 — температура в процессе испытания и до испытания, соответственно.

В условиях воздействия циклического включения-выключения питания и возникающего при этом градиента температур существенно возрастает деформация сдвига для несогласованных по ТКЛР спаев,

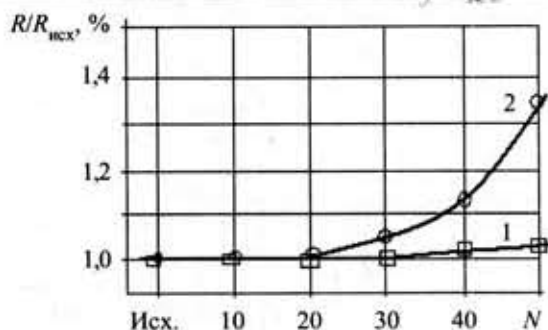


Рис. 3. Зависимость деградации теплового сопротивления $R/R_{исх}$ от числа термоударов N :

1 — монтаж кристаллов на эвтектику Au-Si; 2 — монтаж кристаллов на легкоплавкий припой

вызывая снижение термоусталостного ресурса, появление межзеренного растрескивания и образование пустот в легкоплавком припое [5]. Эти причины приводят к росту переходного теплового сопротивления и последующему перегреву кристалла, вызывая деградацию прибора.

На рис. 3 показано изменение уровня теплового сопротивления при воздействии термоударов $-60 \dots +200^\circ\text{C}$. Как видно из рисунка, 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.

Заключение

Разработана конструкция бескорпусных мощных MOSFET-транзисторов двух исполнений: вариант 1

— на безвыводном молибденовом кристаллодержателе; вариант 2 — с внешними выводами на металло-керамическом держателе (изолированный 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.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кундас С. П., Достанко А. П., Ануфриев Л. П. и др. Технология поверхностного монтажа. — Мн.: «Армита-Маркетинг, Менеджмент», 2000.
2. 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. — С. 54–55.
3. Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Повышение качества монтажа кристаллов в приборах силовой электроники // Мат-лы II Междунар. науч.-тех. конф. «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». Т. 1. — Новоолок. — 2002. — С. 17–20.
4. 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. — 1989. — Вып. 12. — М.: ЦНИИ «Электроника».
5. Кузин А. Г., Лучков Е. Н., Рыбалов Е. И. Малоцикловая термоусталость паяных соединений микроселектронных компонентов при поверхностном монтаже // Там же. Сер. 10. Микроэлектронные устройства. — 1988. — Вып. 1.

НОВЫЕ КНИГИ

Марти Браун. Источники питания. Расчет и конструирование. — К.: МК-Пресс, 2005. — 288 с.

В книге поэтапно показано проектирование широкого набора источников питания. С ее помощью каждый, кто обладает базовыми познаниями в области электроники, сможет проектировать и создавать источники питания. Кроме общих промышленных подходов к конструированию, системно представлено проектирование линейных, импульсных и квазирезонансных источников питания.

В книгу включена информация о проектировании выходных каскадов, о выборе ИС контроллера и других функциях, имеющих отношение к источникам питания, наподобие управления импульсными источниками питания, потери электрического сигнала, отключения внешнего напряжения и др. Кроме того, рассмотрены методики формирования сигналов, уменьшения основной потери, демпферы и квазирезонансные преобразователи.

Трамперт В. AVR-RISC Микроконтроллеры. Архитектура, аппаратные ресурсы, система команд, программирование, применение. — К.: МК-Пресс, 2006. — 464 с.

В книге дано исчерпывающее описание базовой серии микроконтроллеров семейства AVR от компании Atmel, построенных на базе прогрессивной архитектуры RISC с применением программируемой флэш-памяти EPROM. Кроме того, подробно рассматривается программирование микроконтроллеров данной серии на языке ассемблера, а также среда отладки AVR-Studio и программно-аппаратный набор STK200.

Для всех, кто уже обладает основными познаниями в области построения и функционирования микрокомпьютеров, желает изучить однокристальные микроконтроллеры AVR и успешно претворять в жизнь задачи внутрисхемного управления.

