

Технологические методы повышения надежности силовых модулей

Данная статья знакомит читателей с технологическими методами повышения надежности силовых модулей, рассматривает проблему возникновения деформации медного основания в процессе сборки и возможные методы ее устранения.

Ляля Исламгазина

diod@proton-impuls.ru

Область применения силовой электроники охватывает в настоящее время практически все сферы жизнедеятельности человека: топливно-энергетический комплекс, промышленность, транспорт, связь, быт и т. д. Самой большой и важной областью применения приборов силовой электроники является электропривод.

Сегодня среди всех типов приборов силовой электроники преобладают два: полевые (MOSFET) и биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и интегрированные структуры на их основе. Традиционные приборы, с которых начиналась силовая электроника, — это тиристоры (SCR), включая запираемые (GTO), и биполярные транзисторы (BPT).

Системная интеграция — объединение в едином конструктиве, подсистеме или всей системе функций силовой и информационной электроники, датчиков, электрических аппаратов и т. п. Она развивается в двух направлениях — монолитном и гибридном. Монолитная интеграция объединяет на одном кристалле силовые ключи, драйверы и схемы диагностики и защиты. В настоящее время она достигла значений для блокирующих напряжений до 500 В и токов до 5 А. Этот диапазон мощностей будет расширяться медленно. Причина заключается в том, что неэкономично получать мощные высоковольтные и сильноточные ключи в едином технологическом процессе с созданием низковольтных цифровых и аналоговых элементов управляющей части монолитного прибора. Гибридная интеграция получила большее развитие и имеет четыре уровня: модуль, интеллектуальный модуль, интеллектуальная подсистема, интеллектуальная силовая электронная система.

Первые силовые модули с изолированным основанием (медным) были выпущены в 1974 году фирмой SEMIKRON. В настоящее время в России рынок силовых полупроводниковых приборов представлен продукцией не только иностранных фирм, но и отечественных производителей.

По типу конструкции силовые модули можно условно разбить на два типа: паяные с изолированным основанием и модули прижимной конструкции (Pressure-Contact).

Схематично базовая конструкция современных модулей, изготовленных методом пайки, показана на рис. 1.

Чипы силовых полупроводниковых приборов IGBT, FRD или SCR (7) припаиваются на DBC-кера-

мику (Direct Copper Bonded), являющуюся электроизолирующим и теплопроводящим слоем между чипами и основанием (тепlostоком). DBC-керамика (8) представляет собой тонкую пластину из керамики Al_2O_3 или AlN, покрытую с двух сторон медной фольгой методом прямого (диффузионного) сращивания. Нижний слой — сплошной, верхний образует печатную плату, обеспечивающую электрическое соединение силовых ключей, силовых (1) и управляющих (2) выводов. Соединение силовых (эмиттеры IGBT, катоды FRD или SCR) и управляющих выводов чипов с контактными площадками DBC-керамики осуществляется при помощи алюминиевой проволоки (6) методом ультразвуковой сварки. DBC-керамика с припаянными силовыми выводами-шинами (5) и напаянными и разваренными IGBT-, FRD- или SCR-чипами припаивается на медное основание (9). К основанию приклеивается пластмассовый корпус (3), внутри которого полупроводниковые чипы и керамика залиты кремнийорганическим гелем (5), не теряющим защитные механические и электроизоляционные свойства под воздействием температуры, влажности и времени. Дополнительную жесткость конструкции придает слой эпоксидного компаунда, в некоторых конструкциях он может отсутствовать. Силовые выводы (1) загнуты над гайками, установленными в верхней части корпуса или в крышке корпуса, и подсоединяются к шинам силовой схемы преобразователя винтами. Управляющие выводы (2) соединяются со схемой драйвера фаcтен-контактом или пайкой. Основная мощность рассеивается в силовых кристаллах, а выделяемое тепло передается через DBC-керамику на основание и далее, через радиатор,



в окружающую среду. Паяное соединение необходимо для обеспечения хорошего теплового контакта и уменьшения теплового сопротивления.

В интеллектуальном модуле силовая часть изготавливается так же, как и в стандартных модулях паяной конструкции, а интеллектуальная размещается на многослойной печатной плате над силовой частью.

В модулях прижимной конструкции (Pressure-Contact) все связи осуществляются за счет запрессовки и прижима, соединение выводов силовых кристаллов выполнено с помощью пружинных контактов, а медное основание отсутствует. Пайка используется только для установки силовых кристаллов на керамическую плату.

Широко используемая в настоящее время конструкция модулей, в которых применяются сварные и паяные соединения, не позволяет получить оптимальное сочетание электрических, конструктивных показателей и надежности, особенно для тяжелых условий эксплуатации.

Различают две основные причины отказа узла из-за термоциклирования силовых модулей, связанных с несогласованностью коэффициентов теплового расширения (КТР) различных материалов:

- разрушение и обрыв сварного соединения между чипами и алюминиевыми проводниками ($\Delta KTR_{Al-Si} = 19,5$);
- усталость и разрушение паяного слоя между медным основанием и нижней поверхностью DBC-керамики ($\Delta KTR_{DBC-Cu} = 10,8$).

Усталость и старение припойного слоя между кремниевыми чипами и верхней поверхностью DBC-керамики даже при большой поверхности кристаллов незначительны, так как современная керамика для силовых модулей из Al_2O_3 толщиной 0,32–0,63 мм или AlN толщиной 0,36–1,0 мм с медной металлизацией толщиной 0,3 мм имеют почти совмещенные с кремниевыми чипами КТР ($\Delta KTR_{AlN-Si} = 2,2$). В таблице указаны КТР и теплопроводность наиболее широко используемых материалов.

Устранение или компенсация первой причины отказов осуществляется несколькими методами:

- Поверхность кристалла, предназначенную под разварку алюминиевой проволокой, покрывают тонким слоем (4 мкм) алюминия или многослойной структурой Cr (1 мкм) — Ni (4 мкм) — Ag (6 мкм), создавая, таким образом, переходный слой.
- В серии IGBT-модулей для электротранспорта алюминиевую проволоку разваривают на молибденовую прокладку, припаяваемую к кремниевому чипу, являющуюся термокомпенсатором, — в этом случае разница в КТР с 19,5 уменьшается до 1,7 (между кремнием и молибденом).
- Вместо ультразвуковой сварки алюминиевой проволоки и поверхности кристалла применяют пайку ленточных проводников из меди.
- Вместо ультразвуковой сварки применяют прижимной контакт.

Таблица. КТР и теплопроводность наиболее широко используемых материалов

Материал	Коэффициент температурного расширения, (ppm/K)–(10 ⁻⁶ /°C)	Теплопроводность, (W/mK)–Вт/(м·°C)
AlN — нитрид алюминия	3,3	150–190
Al ₂ O ₃ — оксид алюминия	5,5–7	25–35
BeO — боксит	6,3	260
SiC — карбид кремния	3,7	390
Алмаз	0,8–2	1000–2000
Al — алюминий	23	150–220
Cu — медь	17	400
Si — кремний	3,3–5,5	150
Mo — молибден	4,8–5,2	135–150
Fe-Ni — инвар	3,1	11
Fe-Ni-Co — ковар	5,3	17

Пайка, обеспечивающая жесткую связь керамики и меди, оказывается основным источником отказов силовых модулей. Разность КТР приводит к значительным (более 1 мкм) перемещениям в соединительном слое при изменении температуры модуля. После определенного числа термоциклов начинается ухудшение теплового контакта в этом соединении и рост теплового сопротивления. В результате повышается градиент температуры, растут потери, и отслаивается медное основание. Использование промежуточных слоев для улучшения согласования КТР, что практикуется в конструкции некоторых модулей, также приводит к росту теплового сопротивления.

Как показывают испытания, при пайке ухудшается качество поверхности медного основания, появляются местные напряжения и изгибы. Для компенсации неравномерности приходится использовать достаточно толстый слой теплопроводящей пасты между основанием силового модуля и алюминиевым охладителем, на который он крепится при эксплуатации. Теплопроводящая паста представляет собой суспензию порошка окиси металла в масле с теплопроводностью 0,8 Вт/(м·°C). Слой пасты (более эффективный, чем воздух) существует как тепловой барьер между основанием модуля и охладителем, это вносит значительный вклад в суммарное тепловое сопротивление «кристалл — окружающая среда» и, следовательно, приводит к перегреву кристалла.

После пайки, независимо от того, в какой среде она происходила, во время охлаждения основания и DBC-керамики (с Si-чипами и Al-связями) до температуры отверждения припоя в результате термической усадки будет наблюдаться деформация основания с центральным радиусом изгиба (см рис. 2) из-за разницы коэффициента теплового расширения основания сравнительно с КТР_{DBC} керамики и большой площади соприкосновения.

Изменение кривизны поверхности меди при пайке очень трудно поддается контролю — оно зависит от геометрии сопрягаемых поверхностей, режимов охлаждения после пайки, толщины и свойств паяемых материалов, раскрытия медного листа (совпадающего или нет с направлением проката материала) и т. д. Отечественные производители, впервые

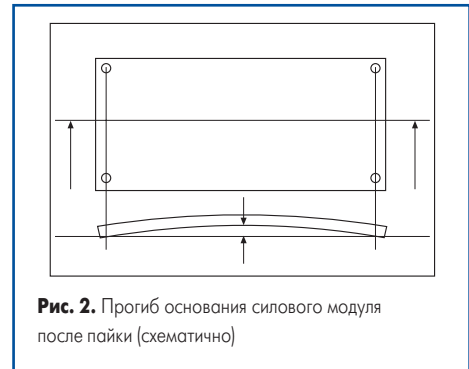


Рис. 2. Прогиб основания силового модуля после пайки (схематично)

столкнувшись с проблемой деформации основания, перед пайкой жестко крепили основание модуля к плате, превосходящей его по габаритным размерам, в надежде на то, что плата сможет остановить данный процесс. Для обеспечения стабильности параметров медного основания некоторыми производителями за рубежом и в России в настоящее время применяются различные технологические процессы предварительного формирования. На практике было выявлено, что существует прямая зависимость между деформацией медного основания после пайки и отношением длины медного основания к его ширине. Увеличение площади соприкосновения керамики и медного основания также ведет к увеличению кривизны поверхности.

Пластичность припоя, то есть способность сдвигаться по плоскостям скольжения, восстанавливает возникающее напряжение в паяном слое в течение длительного времени.

Процесс моделирования основывается на знании аналитического уравнения, описывающего свойства материалов. Некоторые особенности геометрии также могут влиять на изгиб и изменения в слое припоя между DBC-керамикой и медным основанием. Изгибающий момент, действующий снизу на керамику и сверху на основание, передается слою припоя, который деформируется под действием сил сдвига. Это может быть разрывающая или сжимающая деформация, равная усилию сдвига, зависящая от ряда факторов:

$$\varepsilon = \gamma/2 = (L_D \times \Delta\alpha T)/2h \quad (1)$$

где L_D — расстояние от края до центра деформации паяного соединения; $\Delta\alpha$ — разница между КТР паяемых поверхностей; T — абсолютная температура; h — толщина слоя припоя; γ — усилие сдвига.

Процедура расчета использует сложение нескольких сотен сдвиговых деформаций во времени, так как каждое перемещение вносит вклад в процесс восстановления деформированного основания. На рис. 3 показаны суммарные деформации, которые получаются при изготовлении силовых модулей.

Медные основания (118×58×3 мм), получившие в процессе предварительного формирования прогиб 150–250 мкм и имеющие вогнутую форму, после пайки деформируются и становятся выпуклыми с величиной прогиба 150–250 мкм. Суммарное значение деформации достигает 450 мкм. С течением времени, приблизительно через 1000 часов хранения

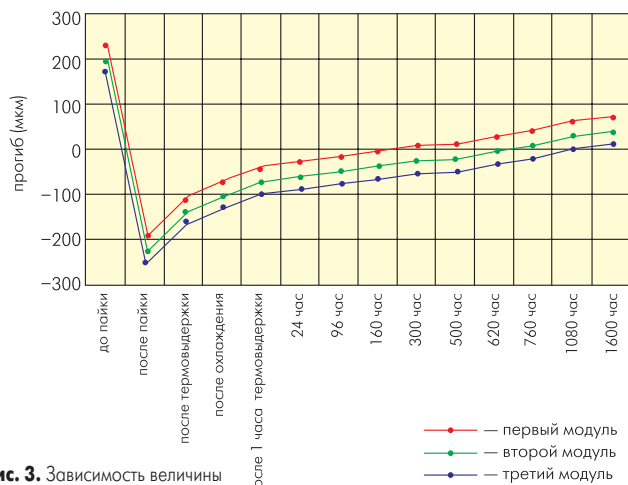


Рис. 3. Зависимость величины деформации медного основания от этапов технологического процесса сборки модулей и времени восстановления

при комнатной температуре, происходит восстановление деформированного основания (величина прогиба колеблется в пределах 0–150 мкм).

На рис. 4 показаны расчетные и полученные экспериментальным путем значения деформации медного основания толщиной 3 мм с напаянными на него двумя DBC-керамиками (0,3 мм Cu, 0,38 мм Al₂O₃, 0,3 мм Cu) длиной по 48 мм каждая. Толщина слоя припоя SnPb40Ag1 составляет 0,2 мм. На величину прогиба основания влияет общая площадь DBC-керамик, независимо от их количества. Изгиб определяется вдоль всего модуля. На рисунке видно, что величина прогиба медного основания, не подвергнувшегося предварительному формованию, достигает 400 мкм через 1 час после процесса пайки, но с течением времени, после 1000 часов хранения при комнатной температуре, происходит неполное восстановление основания, то есть величина деформации уменьшится и составит около 150 мкм. В связи с тем, что припойные сплавы SnPb37Ag2 и SnPb40Ag1 имеют схожие свойства, деформация и восстановление соединений, паяных этими припоями, происходит на одинаковую величину и с одинаковой скоростью.

На рис. 5 показаны расчетные и экспериментальные данные, полученные после пайки и охлаждения медного основания и DBC-керамики припоем SnAg3,5 с толщиной слоя 0,2 мм. Длина керамических подложек — 20 мм. Как видно на рисунке, величина прогиба основания через 1 час после пайки составила 6–8 мкм, что связано с меньшими размерами DBC-керамики и более высокой пластичностью припоя SnAg3,5, чем рассмотрено в предыдущем случае.

В случае пайки легкоплавкими припоями при охлаждении припой должен сжиматься охватываемой деталью. Это вполне справедливо при указанном виде пайки, так как легкоплавкие припои имеют низкую механическую прочность (плохо работают на растяжение), и паяные таким припоем соединения обычно не работают при высоких температурах. Вопросы о наиболее целесообразной конструкции со-

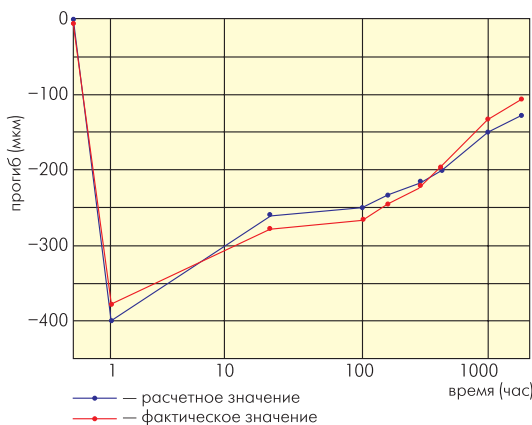


Рис. 4. Зависимость величины деформации медного основания от времени восстановления при использовании припоя SnPb37Ag2 (SnPb40Ag1) для сборки модулей

единения (взаимное расположение деталей, толщина шва и др.) решаются сейчас главным образом опытным путем. Для уменьшения напряжений в шве должна быть предусмотрена возможность легкой (местной) деформации одной из деталей. Обычно местные ослабления делают на деталях из более пластичного материала. Количество припоя, его состав, форма и расположение играют большую роль в получении доброкачественного шва. Припой может наноситься на соединяемые детали в виде гальванического покрытия, фольги или пасты. При пайке объектов сложной формы, содержащих детали разных масс и особенно металлокерамические узлы, замедленное остывание является благоприятным фактором, так как способствует выравниванию температуры во всех точках изделия и сохранению равномерного постепенного охлаждения. Таким образом, предотвращается возникновение внутренних напряжений в паяемом изделии и коробление его.

Необходимость получения качественного паяного соединения и уменьшение деформации медного основания после пайки и охлаждения накладывает жесткие ограничения на размер керамической платы и, следовательно, на допустимую плотность мощности. Из-за этого в силовых модулях приходится применять несколько DBC-плат с небольшим зазором между ними, однако многочисленные промежуточные соединения в свою очередь могут привести к росту паразитных параметров. Кроме размеров керамических подложек на величину прогиба основания влияет скорость нагрева и охлаждения паяного соединения. При медленном нагреве и охлаждении слой припоя, благодаря своей пластичности, будет являться демпфером между медным основанием и DBC-керамикой, имеющими различные КТР. Фирма Ceramtek, выпускающая ABM- и DBC-керамику, широко используемую российскими производителями силовых модулей, с целью исключения деформаций, появления внутренних напряжений и трещин на керамике и кремниевых чипах рекомендует проводить процесс пайки в защитных средах и при следующем температурном профиле: 25–30 минут нагрев, 5–6 минут выдержка и 25–30 минут охлаждения. Однако, как показывает практика, температурный профиль зависит от ряда факторов, и дать четкие рекомендации по его выбору невозможно.

Литература

1. Колпаков А. Обеспечение надежности силовых IGBT-модулей Semikron // Электронные компоненты. 2003. № 4.
2. Флоренцев С. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники // Современные технологии автоматизации. 2004. № 2.
3. Poeh Max, Eisele Ronald. Modelling behaviour of large area solder joints // PCIM Europe. 2000. № 8/9.
4. Ковалевский Р. Е., Чекмарев А. А. Конструирование и технология вакуумплотных паяных соединений. М.: «Энергия».
5. Catalog products and technologies. Ceramtek electronics GmbH. Germany. 2003.
6. Olesen K., Eisele R., Poeh M.-H. Reliability of power modules for mobile applications // PCIM Europe. 2002. № 10.

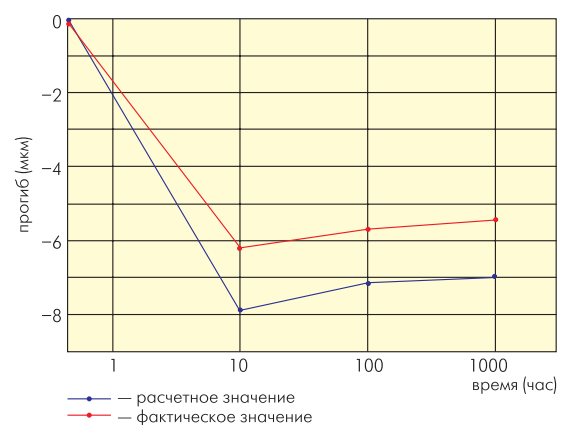


Рис. 5. Зависимость величины деформации медного основания от времени восстановления при использовании припоя SnAg3,5 для сборки модулей