

Особенности сборки силовых модулей в условиях перехода к бессвинцовым технологиям

Ляля ИСЛАМГАЗИНА
diod@proton-impuls.ru

В соответствии с решением ЕС, с 1 июля 2006 года вся поставляемая на европейский рынок электроника (за исключением изделий военной и медицинской техники) должна производиться по бессвинцовой технологии. Рынок силовой преобразовательной техники, особенно в области мощных приводов, требует освоения технологии с использованием материалов, не содержащих свинца, а также (наряду с обеспечением качества пайки) увеличения надежности, повышения мощности электронных модулей и при этом уменьшения габаритов.

В настоящее время отечественные разработчики и производители электронной аппаратуры испытывают недостаток в нормативной документации, отвечающей современным требованиям. Они теперь должны сами проводить работы по выбору материалов, отработке технологий, изучению и поискам дополнительных сведений, в том числе и из рекомендательных международных стандартов. Решить данную проблему в создавшейся ситуации пытаются специалисты ЗАО «Протон-Импульс». Они самостоятельно методом проб проводят практические работы с новыми материалами, не содержащими свинец, ищут оптимальные варианты применения технологических приемов, обеспечивающих высокое качество изделий.

Практически все типы оборудования мощностью от единиц киловатт до единиц мегаватт разрабатываются с использованием силовых модулей. В настоящее время силовые IGBT-модули выпускаются на ток 10–2400 А и коммутируемое напряжение 0,6; 1,2; 2,7; 2,5 и 3,3 кВ. Модули широко используются в регулируемом технологическом и тяговом электроприводе, вторичных источниках питания, в металлургии, химии, машиностроении, связи и энергетике.

Силовые модули могут функционировать при условии, что имеется эффективный отвод тепла, осуществляемый через многослойную структуру к наружной поверхности корпуса, охлаждаемой воздухом. Независимо от типа полупроводникового прибора, его основная характеристика — коммутируемый ток — подвержена заметному влиянию положительных температур. Из-за интенсивного нагрева коммутирующего элемента во включенном состоянии это влияние тем

сильнее, чем выше установленный для него номинальный ток. Уже при температуре 30 °С режиссирование токов 10–25 А обеспечивается силовыми модулями только совместно с радиатором охлаждения или при монтаже на теплопроводящие поверхности. Если радиатор не используется, то коммутируемый ток следует снизить относительно продекларированной изготовителем величины номинального тока на 40–60%. Дальнейшее повышение температуры до 90–110 °С приводит к необходимости снижать коммутируемый ток на 80% для реле с радиатором и на 90%, если он отсутствует.

Основным фактором обеспечения максимальной производительности полупроводниковых приборов является эффективность передачи тепла от поверхности к воздуху, характеризующаяся тепловым сопротивлением. Чем ниже тепловое сопротивление, тем лучше отвод тепла. На практике распределение тепла внутри устройства никогда не является равномерным. Если источником тепла является кристалл тиристора (транзистора или диода), то передача тепла от него осуществляется по конусообразному каналу (конической тепловой трубе) аналогично тому, как распространяются звуковые волны или свет. Но из-за того, что источники тепла имеют определенные размеры и конфигурацию, правильного конуса не получается.

Передача тепла из одного места (кристалл) в другое (окружающий воздух) определяется толщиной слоев и тепловым сопротивлением материалов, а также площадью их касания (чем больше площадь касания, тем большее количество тепла может быть передано). Часто недостаточное внимание уделяется тому факту, что неблагоприятный

эффект от воздействия высокого теплового сопротивления увеличивается по мере приближения к источнику тепла. То есть чем дальше от источника тепла находится слой материала, тем шире в этом месте конус тепловой трубы, следовательно, тем больше снижается влияние теплового сопротивления этого материала. Все это означает, что даже самый хороший теплоотвод с вентиляцией не обеспечит охлаждения кристалла, если переходы «кристалл — корпус» и «корпус — теплоотвод» имеют неоправданно высокие значения теплового сопротивления. Предельные характеристики (ток, напряжение, мощность) ограничиваются максимальной температурой кристалла полупроводникового прибора, которая не должна быть превышена ни при каких режимах работы реле.

Использование DBC-керамики в конструкции реле и силовых модулей снижает величину теплового сопротивления почти в 2 раза по сравнению с конструкцией, в которой используется корпусной силовой элемент, размещенный на теплоотводящем основании с изолирующими прокладками из материала, изменяющего свое физическое состояние под действием температуры нагрева силового элемента (слюды, эластомера на основе силикона и др.). Напомним, что плата DBC (Direct Bonded Copper) — это керамическая пластина с медными шинами, нанесенными методом диффузионного сращивания, на которой устанавливаются силовые кристаллы (рис. 1).

На рис. 2 показано распределение тепла в первом и втором случае.

Из рисунка видно, что в конструкции с DBC-керамикой тепло, выделяемое силовыми полупроводниковыми приборами (крис-

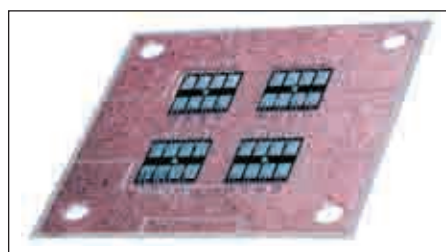


Рис. 1. DBC-плата с напаянными кристаллами транзисторов

таллами), первоначально распределяется в верхнем слое металлизированной керамики, равномерно распределяется по всей толщине изолирующей теплопроводящей подложки, проходит через нижний слой металлизации и передается основанию прибора, а затем и охладителю. Таким образом, конус тепловой трубы становится шире, а следовательно, снижается и тепловое сопротивление.

На практике это означает, что простое увеличение площади керамической подложки может обеспечить более эффективный отвод тепла, чем использование сложного радиатора с вентилятором.

В настоящее время в полупроводниковой промышленности наибольшее распространение получили следующие способы присоединения кристаллов на подложку: пайка припоями; пайка эвтектическими сплавами; сплавление; приклеивание токопроводящими клеями или нетокопроводящими клеями на органической основе; крепление кристалла с помощью легкоплавких или тугоплавких стекол. Способ присоединения кристалла должен обеспечивать: соответствующий отвод тепла; высокую механическую прочность и надежность соединения; малое сопротивление контакта. Из всех вышеперечисленных способов крепления кристалла пайка является единственным способом, обеспечивающим электрические и тепловые характеристики силовых полупроводниковых приборов, так как припой обладает лучшей теплопроводностью и электропроводностью, чем стекла и клеи.

Основным способом снижения размеров силового модуля одновременно с повышением его мощности является улучшение тепловых характеристик, снижение значения теплового сопротивления, которые зависят от конструктивных особенностей, используемых материалов и технологического процесса сборки.

По типу конструкции силовые модули можно условно разбить на два типа:

- паяные с изолированным основанием;
- прижимной конструкции (Pressure-Contact).

В модулях паяной конструкции установка силовых кристаллов, а также управляющих и силовых выводов на керамическую плату осуществляется пайкой. Силовые модули данной конструкции выпускают не только зарубежные фирмы (такие как Semikron, Eures,

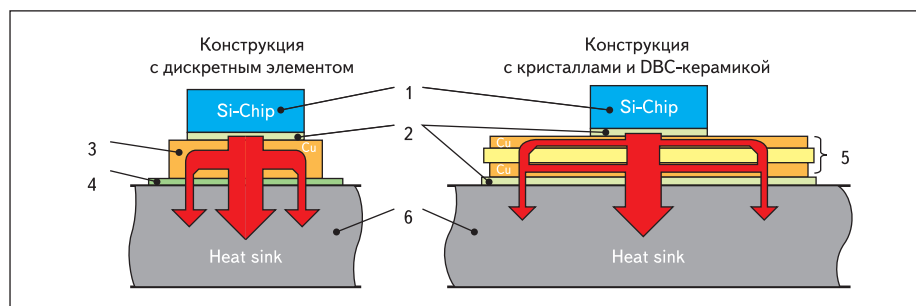


Рис. 2. Распределение тепла в дискретной и модульной конструкции

1 — полупроводниковый кристалл силового элемента; 2 — слой припоя; 3 — медное основание корпусного силового элемента; 4 — изолятор из слюды; 5 — DBC-керамика (состоит из трех слоев); 6 — радиатор (основание силового модуля)

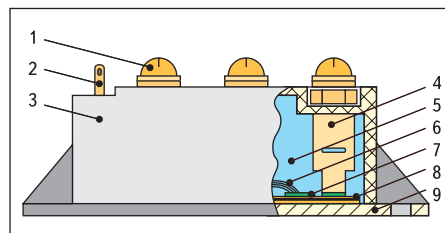


Рис. 3. Сборочный чертеж силового модуля паяной конструкции:

- 1 — силовые выводы (клеммы);
- 2 — управляющие выводы;
- 3 — пластмассовый корпус;
- 4 — шины силовых выводов;
- 5 — кремнийорганический гель;
- 6 — алюминиевая проволока;
- 7 — полупроводниковые чипы;
- 8 — DBC-керамика;
- 9 — медное основание

ABB Semiconductors, IXIS, International Rectifier, Toshiba, Fuji, Mitsubishi), но и отечественные производители, в том числе и ЗАО «Протон-Импульс». Некоторые производители (Crydom) вместо ультразвуковой сварки используют пайку медных ленточных выводов. Схематично конструкция паяной силового модуля показана на рис. 3.

Тиристорные (транзисторные, диодные) чипы припаиваются на DBC-керамику, выполняющую роль электроизолирующего и теплоотводящего слоя между чипами и основанием. 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 выводов (2). Соединение силовых и управляющих выводов чипов, имеющих алюминиевое покрытие, с контактными площадками DBC-керамики осуществляется при помощи ультразвуковой сварки алюминиевой проволокой (6), имеющей относительное удлинение около 10%. DBC-керамика с припаянными силовыми выводами (4), напаянными и разваренными чипами (7) припаивается на медное основание (9), которое служит теплоотводом для полупроводниковых элементов в процессе

работы. К основанию приклеивается корпус (3), внутри которого полупроводниковые чипы и керамика залиты кремнийорганическим гелем (5), не теряющим защитные свойства под воздействием температуры, влажности и времени.

В модулях прижимной конструкции (Pressure-Contact) все связи осуществляются за счет запрессовки и прижима, соединение силовых шин и управляющих выводов кристаллов выполняется с помощью пружинных контактов. Установка кристаллов на керамическую плату может осуществляться как пайкой, так и с помощью прижима (рис. 4).

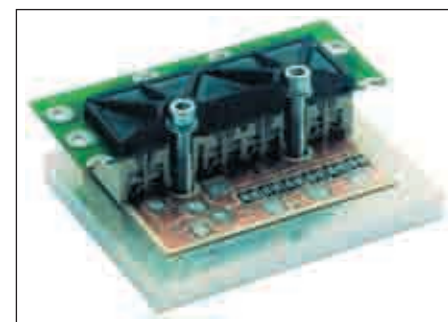


Рис. 4. Конструкция модуля прижимной конструкции с DBC-керамикой, напаянной на медное основание

Конструкцию модуля без медного основания с прямым прижимом DBC-керамики на охладитель использует фирма Semikron в серии модулей SKiiP (Semikron integrated intelligent Power Module), исключая таким образом напряженный паяный слой между основанием и DBC-керамикой (рис. 5).

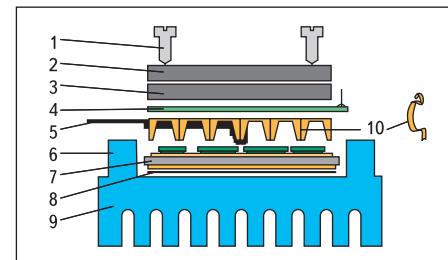


Рис. 5. Конструкция модуля без медного основания с прямым прижимом DBC-керамики на охладитель

В этой серии используются прижимные контакты на соответствующие площадки на DBC-платах с одной стороны и силовые выводы и выходные контакты драйверов управления (4) с другой. На охладитель (9) с рамкой-корпусом (6) через теплопроводящую прокладку (8) кладется DBC-керамика AlN или Al₂O₃ (7) с напаянными и разваренными ультразвуковой сваркой алюминиевой проволокой чипами. Контакты силовые (5), управляющие и датчиков (10) — прижимные. Сверху прижим обеспечивается винтами (1) и крышкой (2) через эластичную прокладку (3). В качестве теплопроводящей прокладки используется матричный материал Hi Flow (Bergquist Company) с изменяющимся фазовым состоянием. Конструкция модулей, имеющая только один паяный слой между кристаллом и DBC-подложкой, обладает высокой надежностью и устойчивостью к термоциклированию.

По типу силовые модули разделяются на обычные (стандартные) IGBT-модули и «интеллектуальные». Обычные модули выпускаются в одно-, двух-, четырех-, и шестиключевом исполнении с обратными быстродействующими диодами (FRD) или без них. Интеллектуальные силовые модули (IPM — Intelligent Power Modules) впервые появились на рынке в 1998 году. Кроме силовой части схемы преобразователя (мостового однофазного или трехфазного выпрямителя, мостового инвертора), они содержат в едином корпусе также датчики, источники питания, схемы драйверов, защиты и диагностики.

В интеллектуальном модуле силовая часть изготавливается, как и в стандартных модулях, а интеллектуальная размещается на многослойной печатной плате над силовой частью. По такой технологии фирмы Fuji, Mitsubishi и Toshiba выпускают целую гамму интеллектуальных силовых модулей на 300 А × 1,2 кВ и 100 А × 1,2 кВ (для каждого ключа) в двухключевом исполнении. На рис. 6 показан интеллектуальный силовой модуль, а его конструкция — на рис. 7.

В качестве драйвера применяются высоковольтные силовые интегральные схемы, обеспечивающие, кроме формирования импульсов для управления затворами IGBT, функции защиты силовых ключей от перегрузок

по току (OC — Over Current), включая короткое замыкание, защиту от перегрева (OT — Over Temperature) и аварии (недопустимого понижения) напряжения питания драйверов (UV — Under Voltage). В отдельные IPM добавлены гальваническая развязка управляющих сигналов и источники питания. В следующем поколении планируется включить в состав IPM также и контроллер управления.

Увеличение температуры перехода на каждые 10 °С приводит к снижению надежности полупроводниковых устройств на 50%. Поэтому проблема охлаждения выходит за рамки простых оценок и становится важным фактором повышения надежности этих устройств, выраженной в среднем времени наработки на отказ.

Основание силовых модулей выполняет две функции: равномерного распределения температуры от локальных источников тепла, которыми являются полупроводниковые приборы, производящие в среднем около 85% генерируемого тепла, и передачу выделяемого тепла в радиатор. В зависимости от технологии изготовления основания силового модуля его поверхность (гнутая, штампованная, фрезерованная или полированная) может иметь неровности до 0,254 мм по всей площади и до 0,508 мм в отдельных местах. Наличие таких больших зазоров может привести к выходу модуля из строя вследствие его перегрева. В этом случае оптимальным является использование эластомера — несмотря на некоторое ухудшение характеристик, модуль сохранит свою работоспособность.

По мере приближения к кристаллу прокладка из теплопроводящего материала должна иметь минимальную толщину и максимально возможную теплопроводность. Под кристаллом тепловой интерфейс находится в узкой части тепловой конической трубы, площадь соприкосновения не превышает 6,45 мм², неровности поверхности будут минимальны.

Как показывают испытания, при пайке керамики на основание 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 ко-

торый он крепится при эксплуатации. Слой пасты (более эффективный, чем воздух), имеющей теплопроводность $\lambda = 0,8$ Вт/м·°С, является одновременно и тепловым барьером между основанием модуля и охладителем, что вносит значительный вклад в суммарное тепловое сопротивление «кристалл — окружающая среда» и, следовательно, приводит к перегреву кристалла.

После пайки, независимо в какой среде она происходила, во время охлаждения основания и DBC-керамики (с кремниевыми чипами и связями из алюминия) до температуры отверждения припоя в результате термической усадки будет наблюдаться деформация основания с центральным радиусом изгиба (рис. 8) из-за разницы коэффициентов теплового расширения (КТР) основания и керамики, а также большой площади соприкосновения.

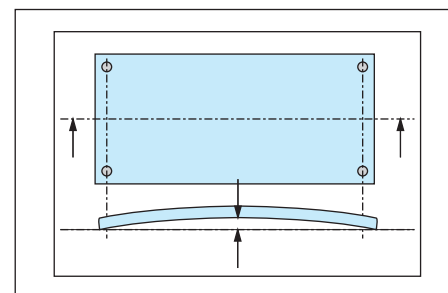


Рис. 8. Схематичное изображение прогиба основания силового модуля после пайки

Изменение кривизны поверхности меди при пайке очень трудно поддается контролю, зависит от геометрии сопрягаемых поверхностей, режимов охлаждения после пайки, толщины и свойств паяемых материалов, раскроя медного листа (совпадающего или не совпадающего с направлением проката материала) и т. д. Отечественные производители, впервые столкнувшиеся с проблемой деформации основания, перед пайкой жестко крепили основание модуля к плите, превосходящей его по габаритным размерам, в надежде на то, что плита сможет остановить данный процесс. Для улучшения стабильности параметров медного основания некоторыми производителями за рубежом и в России в настоящее время применяются



Рис. 6. Внешний вид силового интеллектуального модуля

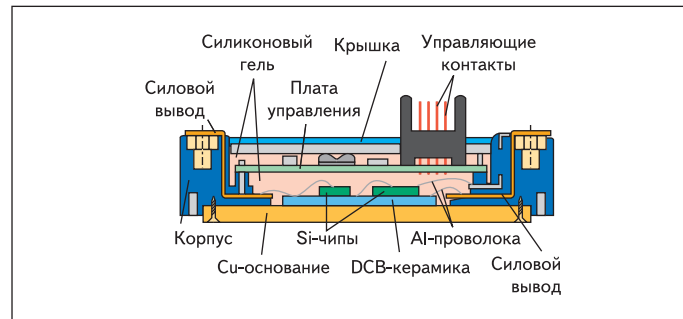


Рис. 7. Конструкция интеллектуального силового модуля

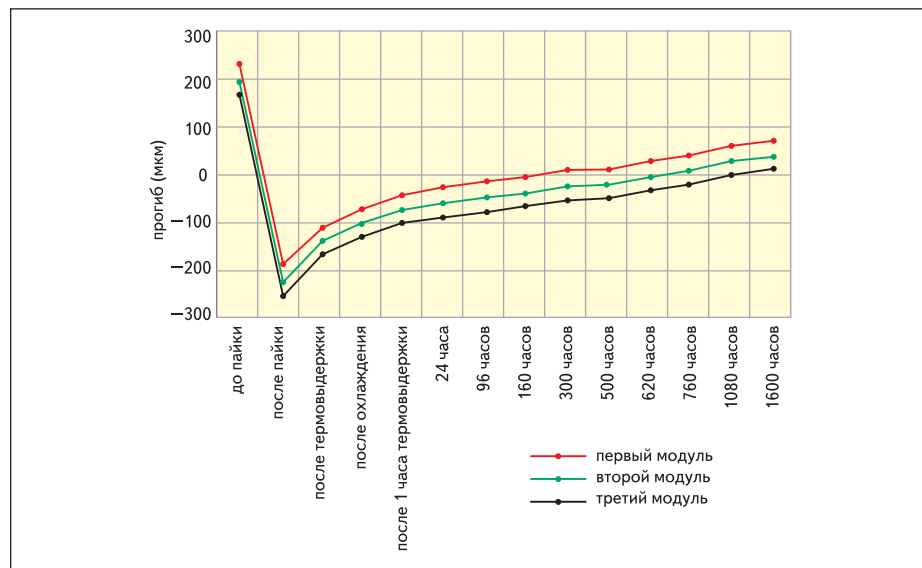


Рис. 9. Зависимость величины деформации медного основания от этапов технологического процесса сборки модулей и времени восстановления

различные технологические процессы предварительного формования. 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.

Медные основания (118×58×3 мм), получившие в процессе предварительного формования 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 при комнатной температуре, происходит восстановление деформированного основания, и величина прогиба колеблется в пределах 0–150 мкм. Пластичность припоя, то есть способность сдвигаться по плоскостям скольжения, восстанавливает возникающее напряжение в паяном слое в течение длительного времени. На величину прогиба основания независимо от их количества влияет общая площадь DBC-плат. Изгиб определяется вдоль всего модуля (рис. 9).

В случае пайки легкоплавкими припоями при охлаждении припой должен сжиматься охватываемой деталью. Вопрос о наиболее целесообразной конструкции соединения (взаимное расположение деталей, толщина шва и др.) решается 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. При-

пой 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 его коробление.

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.

После определенного числа термоциклов ухудшается тепловой контакт между керамикой и медным основанием, кристаллом и керамикой, что влечет за собой повышение градиента температуры, возникновение потерь и разрушение сварного шва.

Первая проблема устраняется использованием конструкции модуля без медного основания с прямым прижимом керамики на охладитель или использованием матричных композиционных материалов в качестве теп-

лопроводящего основания (ММС — Metal Matrix Composite). ММС имеют высокую теплопроводность (как у алюминия), низкий коэффициент температурного расширения, что позволяет минимизировать термические напряжения в конструкции модуля — как в чипах силовых приборов, так и в припойном слое между DBC-керамикой и ММС-основанием. Высочайшая надежность и устойчивость к термоциклированию (40 тыс. циклов) силовых IGBT-модулей с применением ММС-основания позволяет использовать их на электротранспорте. Такие модули производятся зарубежными фирмами (Hitachi, Eupres, Semikron и др.) в одно- и двухключевом исполнении на ток до 2,4 кА и напряжение 1,7 и 2,5 кВ. Так как от теплопроводности DBC-платы зависят тепловые характеристики всего изделия, снижение значения теплового сопротивления также может быть достигнуто за счет использования нитрида алюминия AlN вместо Al₂O₃ в качестве материала для DBC-платы — это связано с более высокой теплопроводностью нитрида алюминия, большой механической прочностью и однородностью поверхности.

Вторая проблема устраняется технологическими критериями: качественной пайкой кристалла на DBC-плату, выбором комплектующих и материалов, в том числе и маркой припоя, а также испытаниями и контролем изделия в целом.

Остановимся подробнее на второй проблеме — ухудшении теплового контакта между кристаллом и DBC-платой. Основными дефектами соединения силового кристалла с другими материалами являются:

- Усталость крепления кристалла, которая обычно вызывается разностью температур между кристаллом и керамикой, разными коэффициентами теплового расширения. Это проявляется в растрескивании или разламывании кристалла или в образовании раковин и пор в креплении кристалла, что приводит к ухудшению сопротивления во включенном состоянии и (или) теплового сопротивления и, естественно, уходу тепловых параметров. Эти отказы случаются, главным образом, после наработки. Тепловая усталость данного крепления кристалла обычно выявляется тестом циклирования по питанию. В этом тесте ток подается до тех пор, пока температура не достигнет заданной величины (обычно 70 °С). Затем питание отключается и вентиляторы, охлаждающие кристалл с основанием, снижают температуру до температуры окружающей среды. Цикл повторяется, пока не начинается существенное ухудшение параметров. Каждый цикл занимает обычно от двух до шести минут.
- Усталость термокомпрессии. Этот вид дефекта подобен предыдущему. Испытания приборов проводятся также тестом циклирования по питанию, хотя иногда используются более простые, но менее эффектив-

ные тесты (температурное циклирование без подачи какого-либо питания).

- Коррозия металла. Когда кристалл упаковывается в негерметизированный корпус, возникают разрушающие процессы. Стандартным тестом для ускорения этого вида отказа является тест «85/85» ($T = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 85% относительной влажности).

В жестких условиях окружающей среды (влажность, температура, смещение) ожидается, что обычно будет преобладать один из видов отказов:

- избыточные токи утечки под действием обратного смещения будут увеличиваться до величины, вызывающей параметрический уход от норм Igss;
- коррозия внутренней металлизации будет приводить к увеличению сопротивления во включенном состоянии ($R_{ds(on)}$), приводящем к состоянию разомкнутой системы.

Причина, вызывающая оба эти явления, — проникновение воды из атмосферы к поверхности кристалла. Вода образует пути для внешних поверхностных утечек что в итоге приводит к параметрическому отказу. Перед герметизацией кристалл или собранный узел должен содержаться в среде с отсутствием влаги, так Igss и Idss особенно чувствительны к поверхностной влаге. Так как корпус силовых модулей не герметичен, то герметизацию (защиту) силовых кристаллов выполняют кремнийорганическим компаундом высшего качества в виде геля, имеющего:

- отличную адгезию к различным материалам, в том числе к металлам и кремнию;
- способность к восстановлению («самозалечиванию») при нарушении целостности;
- небольшую вязкость, благодаря которой гель способен проникать в труднодоступные места, не образуя пузырей и раковин.

Рекомендуется очистка кристалла (обезжиривание) перед покрытием. Непосредственно перед герметизацией следует выполнять двухчасовой отжиг при $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ для удаления влаги с поверхности.

Результаты испытаний, охватывающие первые два вида отказов, определили два ключевых момента — зависимость способности выдерживать циклирование питания от размера кристалла, материала герметизирующего компаунда (корпуса), марки припоя и технических характеристик проволоки. В серии IGBT-модулей для электротранспорта алюминиевая проволока разваривается на молибденовую прокладку, припаиваемую к кремниевому чипу и являющуюся термокомпенсатором. В этом случае разница в КТР с 19,5 уменьшится до 1,7 (между кремнием и молибденом).

Каждый кристалл, независимо от типа конструкции модуля, индивидуально проходит проверку на МЗУ при комнатной температуре на соответствие электрических характеристик. Из-за электрических ограничений при

тестировании пластин некоторые из основных параметров для приборов в корпусе не могут измеряться, и их значения не могут гарантироваться при поставке в виде кристаллов. Это такие параметры, как рассеиваемая мощность (P_d), область безопасной работы (SOA), тепловое сопротивление ($R_{th(jc)}$), сопротивление во включенном состоянии при номинальном токе ($R_{ds(on)}$), ток индуктивности, ток индуктивности при отсутствии ограничения. Эти параметры зависят от технологии сборки пользователя. Неуказанные параметры гарантируются самой конструкцией прибора. Кристаллы для силовых модулей поставляются потребителям в антистатических кассетах и герметизированных, электростатически экранированных пакетах для защиты во время перевозки. Сразу после открывания тары до сборки кристалл должен храниться в сухой, инертной атмосфере.

Оптимальные условия хранения в азоте: влажность — менее 30%; температура $21 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$; индекс запыленности выше 1000 класса; азот — сухость меньше 4 млн^{-1} , точка росы около $-114\text{ }^{\circ}\text{C}$. Время пребывания кристаллов вне влагозащитной упаковки не должно превышать 24 часов. Чувствительность кристаллов к общим условиям рабочей окружающей среды, даже в чистых комнатах, может привести к загрязнению или повреждению кристалла.

Во избежание механических повреждений кристалл должен переноситься вакуумным пинцетом. Неаккуратное обращение с кристаллами может закончиться внезапными отказами, такими как короткое замыкание, обрыв или утечка, а также привести к скрытым дефектам, проявляющимся при максимальной допустимой температуре и приводящим к лавинному пробую. Поверхность кристалла, предназначенная для пайки на DBC-плату, имеет металлизацию хром (1 мкм) — никель (4 мкм) — серебро (6 мкм). Для кристаллов тиристоров и диодов — это анод, для транзисторов — сток. Поверхность кристалла, предназначенная для разварки алюминиевой проволокой, имеет металлизацию алюминием (до 4 мкм). Для кристаллов тиристоров и диодов — это катод и управляющий, для транзисторов — исток и затвор. Кристаллы, предназначенные для крепления прижимом, имеют металлизацию обеих поверхностей алюминием (до 4 мкм). Используются различные материалы кристаллодержателя или подложки, такие как медь, медь с никелевым покрытием, никель с медным покрытием, молибден с покрытием золотом, бериллий или алюминий и т. д. Перед сборкой с подложки должен быть удален окисел с помощью химической очистки или отжига в водороде.

При приваривании проволоки необходимо следить за тем, чтобы сварка оставалась в пределах контактной площадки, в противном случае прибор может быть поврежден. Кроме того, должны быть установлены оп-

тимальные режимы сварочного оборудования и выполнен тест вытягивания проволоки граммометром, чтобы отслеживать однородность проволоки и прочность сварки. Не допускаются неровности проволоки, бороздки, насечки, сужение проволоки, уменьшающие ее диаметр более чем на 25%. Рекомендуется выборочное тестирование до разрушения и 100%-ное неразрушающее тестирование. Может выполняться повторная приварка брака, хотя от этого можно ожидать снижения процента выхода. Не допускается: след более чем одной повторной сварки в одном и том же месте одной и той же контактной площадки; смещение сварной точки на край кристалла. Кроме того, сварное соединение не должно занимать меньше половины площади отпечатка сварного инструмента на контактной площадке.

Посадка кристаллов методом капиллярной пайки обычно осуществляется в профильной конвейерной печи оловянно-свинцовыми припоями. Свинец, входящий в состав припоя, на воздухе окисляется и покрывается синевато-серой оксидной пленкой (PbO или PbO_2), поэтому свинцовые предметы не имеют металлического блеска. Снять оксидную пленку с поверхности оловянно-свинцовых припоев, изготовленных как в виде фольги, так и в виде проволоки, затруднительно. Кроме того, если свинец испытывает периодические нагревы и охлаждения в процессе эксплуатации, то вследствие высокого коэффициента термического расширения может возникать межкристаллическое растрескивание. Посадку кристаллов рекомендуется осуществлять в чистой печи с водородной атмосферой, хотя допускается среда из азота или формир-газа (азот 85%, водород 15%). Для того, чтобы избежать ухудшения технических характеристик кристалла, температура его во время пайки не может превышать $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, и он должен находиться в диапазоне температур $350\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ не более одной минуты. В последнее время широкое распространение получают коллаповые печи за счет меньших габаритных размеров, а также возможности анализировать и влиять на происходящий процесс пайки. В качестве альтернативных средств посадки кристалла на различные подложки могут использоваться различные виды токопроводящих клеев.

Качество пайки кристалла во многом зависит от месторасположения припоя перед пайкой. Возможно размещение прокладки припоя непосредственно под кристаллом, однако в процессе пайки оксидные пленки и загрязнения на поверхности прокладки при расплавлении остаются в зоне шва, что ухудшает смачиваемость припоем поверхности кристалла и платы DBC, приводит к образованию непропаев и каверн, нарушает сплошность шва, а это, в свою очередь, ведет к ухудшению теплопроводности шва и снижению надежности полупроводниковых изделий. Результаты ультразвукового сканирования

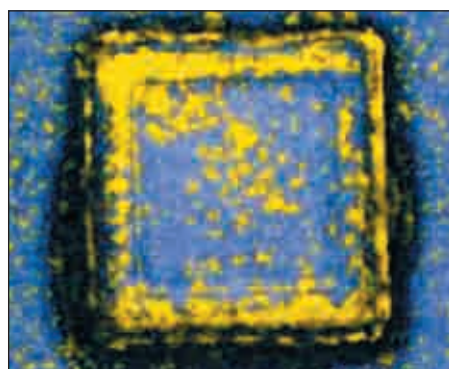


Рис. 10. Результаты ультразвукового сканирования кристалла, припаянного на керамику припоем ПСр 1,5

кристалла, припаянного на керамику припоем ПСр 1,5, показаны на рис. 10 (желтым цветом выделены непропаи и каверны).

Для улучшения смачивания припоем паяемых поверхностей кристалла и подложки широко используется капиллярный эффект заполнения зазора припоем в процессе пайки кристалла. Перед пайкой в непосредственном касании одной из боковых граней кристалла располагается навеска припоя в виде одного или двух шариков (в зависимости от площади кристалла). Детали фиксируются относительно подложки специальной касетой. Кассету со сборками помещают в водородную печь, где при температуре пайки происходит расплавление припоя, который под действием капиллярных сил заполняет зазор между кристаллом и корпусом, смачивает паяемые поверхности и при кристаллизации образуется паяный шов. Оксидные пленки и загрязнения остаются за пределами паяного шва — в месте первоначального расположения навески припоя. Основным недостатком данного способа является высокая температура нагрева, которая значительно выше температуры плавления. Это необходимо для разрушения оксидной пленки припоя и обеспечения его капиллярного течения. Кроме того, при пайке кристаллов больших размеров, особенно в полупроводниковых приборах для силовой электроники, невозможно получить площадь спаев, равную площади кристалла. Из-за неполного смачивания соединяемых поверхностей в паяном шве образуются непропаи (в основном на участке кристалла, противоположном месту расположения навески припоя). Данный способ пайки не подходит для кристаллов, имеющих MESA-структуру. Площадь поверхности кристалла (например, анод тиристора), предназначенной под пайку, гораздо меньше площади $p-n$ -перехода, защищенного стеклом, поэтому навеска припоя не достигнет боковой грани паяемой поверхности, а будет упираться в слой стекла (рис. 11а). Капиллярного эффекта заполнения зазора не возникнет. При пайке диодов и транзисторов, имеющих MESA-структуру, пайка данным способом возможна, так как навеска припоя касается

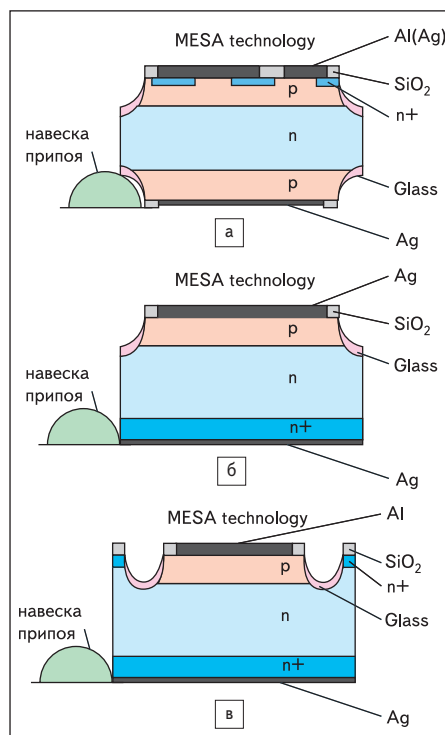


Рис. 11. Невозможность пайки кристаллов, имеющих MESA-структуру, с использованием навески припоя

боковой грани паяемой поверхности, покрытой серебром (рис. 11б, в).

При изготовлении полупроводниковых приборов для увеличения площади спаев между кристаллом и корпусом на верхней плоскости корпуса формируют V-образные канавки глубиной 25–75 мкм, располагаемые друг от друга на расстоянии 0,25–1 мкм. В случае использования корпусов с канавками при пайке корпус или кристалл необходимо подвергать воздействию ультразвуковых или низкочастотных колебаний. Механические колебания должны быть направлены вдоль канавок. В противном случае при пайке кристаллов больших размеров эти канавки являются очагами непропаев.

Несмотря на то, что оловянно-свинцовые припои на протяжении десятилетий зарекомендовали себя как высоконадежные, что очень важно при длительной эксплуатации, они имеют ряд недостатков:

- Низкая температура плавления ($<190^\circ\text{C}$). Поэтому они не могут применяться при сборке кремниевых полупроводниковых приборов, допускающих высокую температуру нагрева (диоды при $U_{обр} \leq 1600\text{ В}$ имеют предельную температуру 190°C , биполярные транзисторы — 200°C). В производстве силовых полупроводниковых приборов при пайке кристаллов необходимо использовать припои с температурой плавления выше 210°C , что связано с температурой эксплуатации модулей и технологическим процессом сборки (сборка в несколько этапов, припоями с различными температурами плавления).

- Высокая температура нагрева при пайке кристаллов большой площади. Например, при пайке припоем ПОС40 и ПСр1,5 в виде шариков и фольги, чтобы разрушить оксидную пленку на поверхности припоя и обеспечить течение (смачиваемость) припоя в зазоре между кристаллом и основанием, требуется температура нагрева $390 \pm 20^\circ\text{C}$ (пайка в водородной печи).

- Интенсивное растворение золота (покрытия и проволоки) как в жидкой фазе при пайке, так и в твердой фазе при эксплуатации.

- При охлаждении паяного соединения свинец быстро рекристаллизуется на участке перепада температур (по периметру кристалла) и не дает выйти газовым включениям из-под кристалла наружу. Таким образом под кристаллом образуются каверны, которые могут занимать до 15% всей площади паяного соединения.

В данной статье рассмотрены составы и температуры плавления некоторых бессвинцовых припоев, представляющих сплавы на основе олова с добавлением в него Ag, Cu, Bi, Zn и других металлов.

Хорошие результаты показал сплав 95,5Sn/4Ag/0,5Cu: достаточно высокая температура плавления (217°C) позволяет использовать его для пайки изделий, работающих при температуре $\leq 175^\circ\text{C}$ — при некоторых испытаниях он показал лучшую стойкость к переменным температурам, чем припой SnAg.

Производителями припоев предлагается сплав для соединения элементов полупроводниковых приборов с получением повышенной стойкости к термической усталости: 81–92Sn/3–6Ag/0,1–2Cu.

Сегодня выдано более ста патентов на сплавы различных составов для замены свинцовых припоев. Не все сплавы коммерческие, но выбор достаточно широкий. В настоящее время сложно ответить на вопрос, какой сплав лучший, поскольку абсолютно равноценной замены до сих пор не предложено. Сплавы отличаются как по температуре плавления, так и по смачиваемости, прочности и стоимости. Каждый припой обладает уникальным сочетанием свойств, что затрудняет окончательный выбор.

Припои подбирают, исходя из особенностей конструкции, механических и электрических характеристик устройства, условий его эксплуатации. При выборе учитывают также температуру плавления припоя, надежность паяных соединений, устойчивость монтируемых компонентов к температуре пайки, различия режимов пайки.

Особое внимание необходимо обратить на качество припоя, зависящее от доли вредных примесей в сплаве (последние снижают прочность паяного соединения). Известно, что присутствие никеля ведет к образованию каверн, алюминия — к зернистости, железо форсирует образование окалина, избыток меди ведет к недостаточной смачиваемости при пайке, а сурьма повышает хрупкость

Таблица. Основные типы бессвинцовых припоев

Тип	Состав (мас. части), %	Температура плавления, °С
Низкотемпературные бессвинцовые припои		
Sn/Bi (олово/висмут)	Sn42/Bi58	133–140 (эвтектика)
Sn/In (олово/индий)	Sn48/In52	115–120 (эвтектика)
Bi/In (висмут/индий)	Bi67/In33	107–112
Низкотемпературные бессвинцовые припои для замены эвтектики Sn/Pb		
Sn/Zn (олово/цинк)	Sn91/Zn9	195–200
Sn/Bi/Zn (олово/висмут/цинк)	Sn89/Bi3/Zn8	189–199
Sn/Bi/In (олово/висмут/индий)	Sn70/Bi20/In10	143–193
Среднетемпературные бессвинцовые припои		
Sn/Ag (олово/серебро)	Sn96,5/Ag3,5	221 (эвтектика)
Sn/Ag (олово/серебро)	Sn98/Ag2	221–226
Sn/Cu (олово/медь)	Sn99,3/Cu0,7	227 (эвтектика)
Sn/Ag/Bi (олово/серебро/висмут)	Sn93,5/Ag3,5/Bi3	206–213
Sn/Ag/Bi (олово/серебро/висмут)	Sn90,5/Ag2/Bi7,5	207–212
Sn/Ag/Cu (олово/серебро/медь)	Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7	217 (эвтектика)
Sn/Ag/Cu (олово/серебро/медь)	Sn96,5/Ag3/Cu0,5	221
Sn/Ag/Cu/Sb (олово/серебро/медь/сурьма)	Sn96,7/Ag2/Cu0,8/Sb0,5	216–222
Высокотемпературные бессвинцовые припои		
Sn/Sb (олово/сурьма)	Sn95/Sb5	232–240
Sn/Au (олово/золото)	Sn20/Au80	280

паяного соединения на холоде. При выборе припоя предпочтительны эвтектические сплавы, поскольку их кристаллизация происходит в узком температурном диапазоне, при этом отсутствует смещение компонентов, в результате чего достигается более высокая надежность соединений, и меньше вероятность получения «холодных паек». Также требуется соблюдение строгих требований по чистоте применяемых припоев, поскольку только расплавы бескислородных металлов способны активно растворять в значительном количестве оксиды и, следовательно, образовывать спаи, обладающие высокой прочностью.

Основной критерий при выборе припоя — это температура пайки. Все припои по этому признаку можно разделить на четыре группы: низкотемпературные (температура плавления ниже 180 °С), с температурой плавления, равной эвтектике Sn63/Pb37 (180–200 °С), со средней температурой плавления (200–230 °С) и высокотемпературные (230–350 °С). Основные типы бессвинцовых припоев приведены в таблице.

Низкотемпературные припои имеют ограниченное применение. В их состав кроме олова входят висмут и индий. Самые распространенные эвтектические сплавы — олово-висмут и олово-индий. При высоких температурах эксплуатации сплавы с низкой температурой плавления не смогут обеспечить надежные паяные соединения. Существуют ограничения по поставкам индия и висмута, высока и стоимость припоев на их основе.

Большинство среднетемпературных припоев — это сложные по составу сплавы на основе олова с добавлением меди, серебра, висмута и сурьмы. Недостатком SnCu припоев является низкая прочность. Лучшими свойствами обладают сплавы SnAg, у них более высокая смачиваемость и прочность по сравнению SnCu.

Эвтектический сплав Sn96,5/Ag3,5 с температурой плавления 221 °С при испытаниях на термоциклирование показал более вы-

сокую надежность по сравнению с SnPb. Припой Sn96,5/Ag3,5 многие годы успешно применяется в специальной аппаратуре.

Эвтектический припой Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7 был получен в результате доработки базового сплава SnAg. Сплав SnAgCu может быть использован для получения как универсальных, так и высокотемпературных припоев.

Сплав Sn93,5/Ag3,5/Bi3 имеет более низкую температуру плавления, обладает наилучшей паяемостью среди всех бессвинцовых припоев. Добавление меди и (или) германия значительно повышает смачиваемость, а также прочность паяного соединения.

Припой Sn89/Bi3/Zn8 имеет еще более низкую температуру плавления, однако наличие в его составе цинка приводит к ряду проблем. Припойные пасты на этой основе имеют короткое время жизни, требуется флюс повышенной активности, при оплавлении образуется труднорастворимая окалина, паяные соединения подвержены коррозии, требуется обязательная промывка соединений после пайки.

С целью оценки технических характеристик японская компания ESPEC провела ускоренные сопоставительные испытания припоев Sn96,5/Ag3/Cu0,5, SnPb (эвтектика) и Sn89/Bi3/Zn8:

- испытания на устойчивость к высоким температурам — 125 °С в течение 2000 часов;
- термоциклирование при температуре от –40 до +125 °С, 2000 циклов с пребыванием на крайних температурах по 30 мин;
- высокотемпературная повышенная влажность при T = 85 °С и 85% в течение 1000 часов.

В результате этих воздействий отказы получены в пайках припоем Sn89/Bi3/Zn8. Дополнительные исследования показали образование интерметаллических соединений Cu-Zn, сопровождающееся образованием пор на стыке припоя и меди контактных площадок. Этот эффект сопровождается еще одним явлением — выделением цинка в отдельную фракцию и его окислением, что влечет за собой расслоение паек. Припои Sn96,5/Ag3/

Cu0,5 и SnPb успешно выдержали испытания. Результаты проводимых различными фирмами (Motorola, Panasonic и др.) во многих странах исследований говорят о том, что сегодня лидером в бессвинцовой гонке являются сплавы на основе SnAgCu.

В последнее время специалистами ЗАО «Протон-Импульс» проводятся работы по освоению технологического процесса сборки печатных плат и изделий в целом с применением материалов, не содержащих свинец, от различных производителей (Multicore, Cobar, Heraeus и др.). Целью проведения работ является выполнение требований RoHS и пожеланий потребителей, получение качественной пайки. Использование сплавов на основе SnAgCu позволяет одновременно решить два вопроса: добиться качественного соединения кристалла с платой DBC и выполнить требования ЕС, предъявляемые к производителям силовых модулей. Напомним, что плата DBC — это керамическая пластина с медными шинами, нанесенными диффузионным методом, а поверхность кристалла, предназначенная для пайки, покрыта серебром. Таким образом, обеспечивается совместимость между соединяемыми пайкой металлами и составляющими припоя. Процентное содержание серебра является очень важным фактором. Наличие серебра в составе припоя повышает его смачиваемость, делает паяное соединение более гладким (глянцевым), однако содержание его свыше 2% повышает хрупкость и может привести к возникновению интерметаллидов. В результате проведенных работ по опробованию различных припоев и флюсов для сборки силовых модулей были отобраны материалы, которые имеют наименьшее содержание серебра (не более 3,8%) в бессвинцовых припоях. Результаты ультразвукового сканирования кристалла, припаянного на керамику припоем Sn96,5/Ag3/Cu0,5 показаны на рис. 12. Желтым цветом выделены дефекты пайки (непропаи и каверны).

Рекомендуемый температурный профиль пайки кристаллов на керамику в среде формирующего газа показан на рис. 13.

Особенностью технологического процесса сборки силовых модулей паяной конструкции является сборка в два этапа. На первом

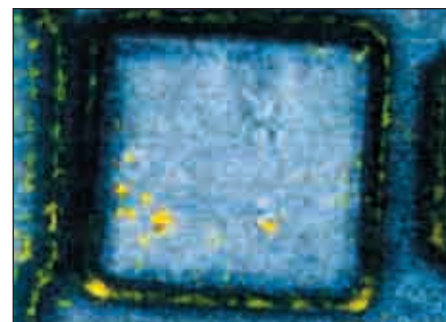


Рис. 12. Результаты ультразвукового сканирования кристалла, припаянного на керамику припоем Sn96,5/Ag3/Cu0,5

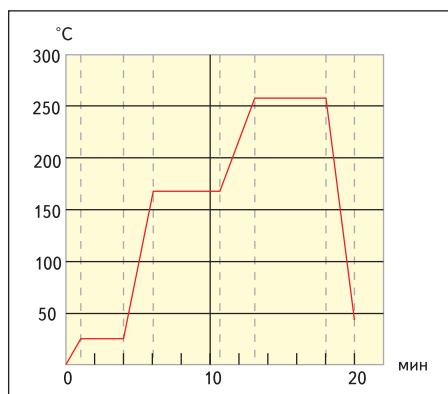


Рис. 13. Рекомендуемый температурный профиль пайки кристаллов на керамику припоем Sn96,5/Ag3/Cu0,5 в среде формирующего газа

этапе осуществляется пайка кристалла на керамику, контроль качества пайки, разварка кристалла, контроль функционирования. На втором этапе — пайка одной или нескольких керамических подложек с кристаллами на медное основание, присоединение силовых шин и управляющих выводов, контроль функционирования, корпусирование, герметизация и испытания. Для того чтобы обеспечить технологический процесс сборки и надежность изделия в целом, необходимо проводить пайку припоями, имеющими разницу температур плавления не менее 70–100 °С. Температура плавления припоя на втором этапе должна быть ниже температуры на первом этапе на 70–100 °С. В таблице можно подобрать припой для обеспечения технологического процесса сборки силовых модулей.

Производители силовых модулей для получения качественного соединения стремятся приобретать оборудование для пайки кристаллов, соответствующее современным требованиям и обладающее системой паров уксусной кислоты с дополнительным ротаметром. Пары уксусной кислоты в процессе пайки снимают окисную пленку с контактирующих поверхностей, не позволяют ей возникать вновь в процессе нагрева. При использовании флюса, также повышающего качество пайки, необходимо устанавливать

дополнительные фильтры — уловители флюса для защиты вакуумного насоса. Такими опциями обладают печи SRO-702(4,6,8) производимые фирмой ATV Technologie. ■

Литература

1. Петрунин И. Е., Маркова И. Ю. и др. Краткий справочник паяльщика. М.: Машиностроение. 1992.
2. Григорьев В. Бессвинцовая технология — требование времени или прихоть законодателей от экологии? // Электронные компоненты. 2001. № 6.
3. Зенин В., Рягузов А. и др. Припой и покрытия для бессвинцовой пайки изделий микроэлектроники // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 5.
4. Медведев А. Летняя конференция-2005 Европейского института печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 4.
5. Poech M., Dr. Eisele R. Modelling behaviour of large area solder joints // PSIM Europe. 2000. № 8–9.
6. Exel K., Haberl P., Maier P. Ready for Take-Off DBS on AlN for Power Semiconductors // PSIM Europe. 1999. № 11.
7. Бер А., Минскер Ф. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высш. школа. 1977.
8. Olesen K., Dr. Eisele R., Dr. Poech M.-H. and other. Reliability of power modules for mobile applications // PCIM Europe. 2002. № 10.
9. Исламгазина Л. Р., Валев С. Н., Юрген Шульц-Хардер. Критерии выбора подложек для силовых модулей // Компоненты и технологии. 2004. № 3.
10. Panzer C., Hierholzer M., Dr. Bayerer R. Power Semiconductor modules for automotive applications // PCIM Europe. 2002. № 6.
11. Исламгазина Л. Технологические методы повышения надежности силовых модулей // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 2.
12. Колпаков А. SKiiP-интеллектуальные силовые модули IGBT фирмы Semikron // Компоненты и технологии. 2003. № 1.
13. Hagenhoff D., Passe T. Fast mounting systems of low power IGBT modules // PCIM Europe. 2002. № 10.