

Применение различных материалов,

обеспечивающих оптимальные тепловые режимы силовых полупроводниковых приборов, в том числе модулей и твердотельных реле

В любом реальном силовом модуле есть специфические компоненты, являющиеся основными источниками тепла. Защитный металлический кожух или основание служат для эффективного отвода тепла и уменьшения разности температур между точками подложки. Для мощных модулей и твердотельных реле, имеющих металлическое основание или радиатор, теплопроводность приобретает гораздо большее значение, чем просто передача тепла окружающему воздуху.

Ляля Исламгазина

diod@proton-impuls.ru

С точки зрения тепловых процессов силовые модули и твердотельные реле могут функционировать при условии, что предусмотрен эффективный отвод тепла, осуществляемый через многослойную структуру к наружной поверхности корпуса, охлаждаемой воздухом.

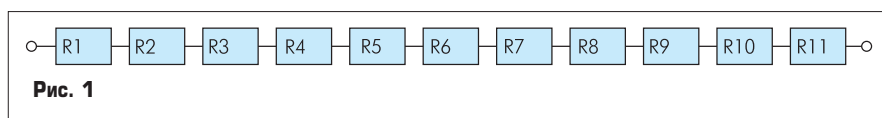
Независимо от типа полупроводникового прибора его основная характеристика — коммутлируемый ток — подвержена заметному влиянию положительных температур. Из-за интенсивного нагрева коммутлирующего элемента во включенном состоянии это влияние тем сильнее, чем выше установленный для него номинальный ток. Уже при температуре 30 °С режим коммутации токов 10,0–25,0 А обеспечивается силовыми модулями (твердотельными реле) только совместно с радиатором охлаждения или при монтаже на теплопроводящие поверхности. Если радиатор не используется, то коммутлируемый ток следует снизить относительно продекларированной изготовителем величины номинального тока на 40–60%. Дальнейшее повышение температуры до 90–110 °С приводит к необходимости уменьшать коммутлируемый 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, характеризуемая тепловым сопротивлением. Чем ниже тепловое сопротивление, тем лучше отвод тепла. На практике распределение тепла внутри устройства никогда не бывает равномерным, всегда имеются так называемые «горячие» точки. Например, если источником тепла становится кристалл тиристора (транзистора или выпрямительная диодная сборка), 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, точного 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, а следовательно, снижается влияние теплового сопротивления данного 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, но она не должна превышать ни при каких режимах работы реле. Зная реальное сопротивление модуля, можно определить максимальный ток и рассеиваемую мощность, при которых не будет превышена предельная температура полупроводниковых элементов приборов, применяемых у потребителя. Тепловое сопротивление R_{th} является характерной величиной для каждого типа прибора и зависит от площади полупроводниковых кристаллов, площади, толщины и типа материалов между чипами и основанием, а также от технологического процесса и качества изготовления, оно связывает предельные электрические возможности по передаче мощности с условиями тепловых ограничений. **Полное тепловое сопротивление R — это сумма тепловых сопротивлений материалов на пути отвода тепла от кристалла.** Изображенная на рис. 1 цепочка тепловых сопротивлений отображает типичный путь отвода тепла от мощного полупроводникового прибора.

$$R=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_6+R_7+R_8+R_9+R_{10}+R_{11}$$



Применение 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 слюды, эластомера на основе силикона, материала, изменяющего свое физическое состояние под действием температуры нагрева силового элемента и др. Напомним, плата DBC (Direct Bonded Copper) — это керамическая пластина с медными шинами, нанесенными диффузионным методом, на которой устанавливаются силовые кристаллы. На рис. 2 показано распределение тепла в первом и втором случае.

Наглядно видно, что в конструкции с DBC-керамикой тепло, выделяемое силовыми полупроводниковыми приборами (кристаллами), первоначально распределяется в верхнем слое металлизированной керамики, затем равномерно распределяется по всей толщине изолирующей теплопроводящей подложки, проходит через нижний слой металлизации и передается основанию прибора, а потом и охладителю. Таким образом, конус тепловой трубы становится шире, а соответственно, снижается и тепловое сопротивление.

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

Основание выполняет две функции: равномерное распределение температуры от локальных источников тепла, которыми являются полупроводниковые приборы, производящие в среднем около 85% генерируемого тепла, и передача выделяемого тепла в радиатор. Увеличение температуры перехода на каждые 10 °C 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.

В зависимости от технологии изготовления основания силового модуля, его поверхность (гнуемая, 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 перегрева. В этом случае оптимальным является использование эластомера: несмотря на некоторое ухудшение характеристик модуля, он сохранит свою работоспособность.

По мере приближения к кристаллу, прокладка 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 см², неровности поверхности будут минимальны, следовательно, идеальной здесь была бы пайка.

Слой теплопроводящей пасты (суспензия порошка окиси металла в масле, $\lambda = 0,8 \text{ Вт/м}^2\text{C}$)

Таблица

	Где возникает	Влияющие факторы
R1	Полупроводниковый переход — нижняя поверхность кристалла	Теплопроводность кремния, толщина подложки
R2	Нижняя поверхность кристалла — связующий материал (припой)	Технология обработки нижней поверхности кристалла, ее металлизация
R3	Связующий материал (припой)	Припой, эпоксидная смола или золотосодержащий эвтектический припой, их состав
R4	Связующий материал — металлизация изолятора	Тип металла, отсутствие пустот, покрытие, шероховатость поверхности
R5	Металлизация изолятора — изолятор	Давление, шероховатость, адгезия
R6	Изолятор (керамика)	Толщина, теплопроводность
R7	Изолятор — металлизация изолятора	Давление, шероховатость, адгезия
R8	Металлизация изолятора — связующий материал	Тип металла, отсутствие пустот, марка припоя, шероховатость поверхности
R9	Связующий материал	Марка припоя, толщина слоя
R10	Связующий материал — теплоотвод	Марка припоя, марка металла, покрытие, конфигурация тепловой трубы между точками ввода тепла в теплоотвод и вывода его, площадь поверхности теплоотвода (основания)
R11	Теплоотвод — воздух	

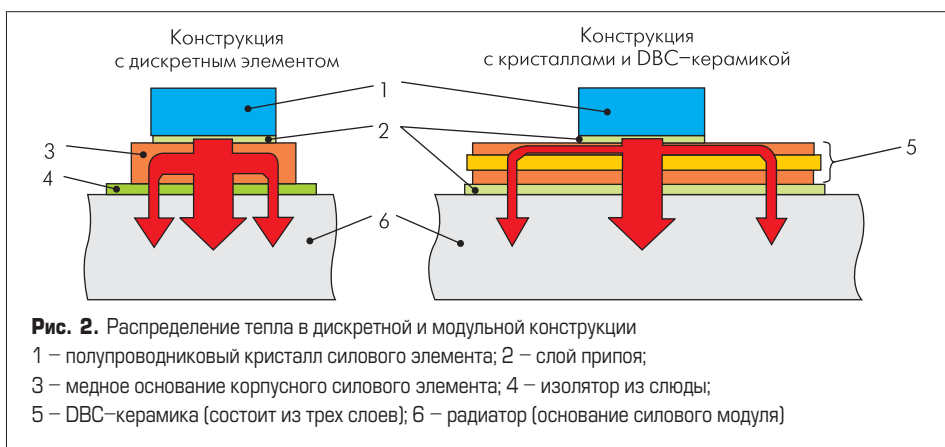


Рис. 2. Распределение тепла в дискретной и модульной конструкции

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)

между корпусом и охладителем существует как тепловой барьер между основанием модуля и охладителем, и это вносит значительный вклад в суммарное тепловое сопротивление «кристалл — окружающая среда». Выпуклая или вогнутая деформация (неплоскостность) основания модуля и охладителя могут привести к появлению воздушных промежутков, которые еще больше ухудшают тепловое сопротивление между основанием модуля и охладителем.

Зарубежные производители, проанализировав отказы, свойственные силовым модулям, выявили, что они вызваны неоптимальным согласованием коэффициентов теплового расширения конструктивных элементов: алюминиевых соединительных выводов кристаллов и медных шин связи; медного основания и керамической пластины DBC, на которой установлены силовые чипы. Наиболее значительные перемещения (свыше 1 мкм) происходят в паяном слое между керамикой DBC и медным основанием. После определенного числа термоциклов начинается ухудшение теплового контакта в этом соединении и увеличение теплового сопротивления. Следствием является повышение градиента температуры и потеря, а также разрушение сварного шва. На практике данные проблемы устраняются при использовании конструкции модуля без медного основания с прямым прижимом керамики на охладитель. При такой конструкции градиент температуры на участке «кристалл-теплоотвод» снижается более чем на 5–10% по сравнению с модулем, имеющим медное основание, и обеспечивается отличное

согласование коэффициентов теплового расширения. Увеличение площади керамической подложки за счет отсутствия медного основания позволило снизить тепловое сопротивление R_{th} на 24% при использовании керамики Al_2O_3 . В некоторых модулях применяется керамическая плата из AlN, что уменьшает тепловое сопротивление еще на 30%. Столь значительное улучшение тепловых характеристик удалось получить за счет того, что нитрид алюминия имеет не только лучшую теплопроводность, но и большую механическую прочность и однородность поверхности. Благодаря этому толщина теплопроводящей пасты снижена с 25 до 15 мкм.

В большинстве, силовые модули крепятся к охладителю с помощью винтов, с усилием около $M = 1,5 \text{ Nm}$, что эквивалентно 1000N. В процессе длительной работы прибор нагревается до $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, материал корпуса (пластмасса) в точке крепления деформируется и возникает зазор, который может достигать величины 5–10 мкм. В связи с тем, что крепление модуля ослабевает, вакуум, созданный с помощью теплопроводящей пасты между DBC-керамикой и охладителем, исчезает и увеличивается тепловое сопротивление прибора в целом. Чтобы избежать данного явления, используются некоторые конструктивные решения, такие как:

- в местах крепления модулей к охладителю устанавливается заклепка, соединяющая корпус и основание. Давление крепежных элементов приходится на шляпку металлической заклепки, а не на пластмассовый корпус;

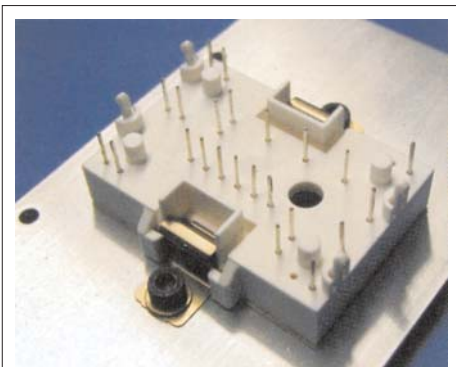


Рис. 3. Прижимы-клипсы

- вместо традиционной пружинной (гроверной) шайбы, используются шайбы, исключющие самостоятельное выкручивание винта в процессе эксплуатации и обеспечивающие его подпружинивание;
- ряд крупных производителей, таких как Eures и Semikron, используют специально разработанные прижимы в виде клипс, которые жестко крепятся к охладителю и, обладая пружинящим эффектом, фиксируют модули (рис. 3).

Результатом резкого улучшения тепловых характеристик стало значительное повышение уровней предельно допустимых токов.

Эффективность отвода тепла от полупроводниковых приборов может быть увеличена с помощью одного или нескольких методов снижения теплового сопротивления, а значит, удельной теплопроводности от внутренних источников тепла в окружающей среде:

- использование большого металлического элемента, обеспечивающего увеличение диаметра конической тепловой трубы, а следовательно, и эффективность отвода тепла в окружающий воздух. Этот метод не всегда применим к мощным силовым модулям, так как изначально считается, что габаритные размеры должны быть малы;
- принудительный обдув воздухом подложки или корпуса, который ускоряет процесс отвода тепла за счет увеличения диаметра конической тепловой трубы. Степень охлаждения имеет ярко выраженную зависимость от скорости воздушного потока и площади обдуваемой поверхности;
- крепление корпуса к большому металлическому элементу шасси, в результате чего достигается суммарное увеличение поверхности теплоотвода;
- крепление металлического основания к ребристому обдуваемому теплоотводу.

Использование ребристой поверхности равносильно увеличению площади простого плоского радиатора (аналогично предыдущему методу), но позволяет получить более компактные конструкции. Важно понимать, что эффективность ребристых радиаторов снижается, если направление воздушного потока совпадает с направлением ребер. Как правило, это самый распространенный способ охлаждения электронных устройств. На практике применение ребристого радиатора высотой 1–2 см разрешает удвоить теплоотдачу по сравнению с плоским основанием.

На эффективность отвода тепла влияют высота ребер, зазор между ними, скорость воздушного потока и его направление. Общая ошибка разработчиков состоит в том, что при выборе системы охлаждения они оценивают объем прокачиваемого воздуха за единицу времени. Число кубометров в минуту ничего не говорит нам о скорости воздушного потока, который должен пройти вдоль нагретой металлической поверхности, измеряется в метрах в минуту и является главной характеристикой охлаждающей системы. Для того чтобы обеспечить максимальную эффективность работы теплоотвода, ребра радиаторов располагают вдоль направления потока охлаждающего воздуха.

Маленький вентилятор, удачно скомпонованный с ребристым радиатором, может оказаться гораздо эффективнее большого вентилятора, обдувающего плохо продуманный теплоотвод, аналогично тому, как маленький вентилятор, направленный в лицо с расстояния десяти сантиметров, обдувает лучше, чем огромный вентилятор, расположенный на расстоянии нескольких десятков метров.

Для наилучшей передачи тепла от основания к радиатору необходимо использовать специальные теплопроводящие пасты и прокладки, сглаживающие естественные неровности поверхностей. Чем больше шероховатость поверхностей, тем толще должен быть вспомогательный слой. В этом качестве используются:

- теплопроводящая паста (смазка) — прекрасный способ соединения относительно плоских и даже плохо согласованных поверхностей, однако при этом необходимо обеспечить очень толстый слой. Недобства: низкая технологичность, большие временные затраты и загрязнение; не обеспечивается электрическая изоляция между прибором и радиатором.
- тонкая алюминиевая фольга (0,051–0,076 мм) с или без парафинового покрытия с обеих сторон. Парафиновое покрытие обеспечивает заполнение микроскопических неровностей на касающихся поверхностях. Недобства: фольга должна прокладываться без складок, которые резко ухудшают теплопередачу; наличие двух поверхностей соприкосновения вместо одной;
- тонкая прокладка из теплопроводящего, но изолирующего материала (каптона, полиамидной пленки). Недобство: худшая теплопроводность, чем у алюминиевой фольги;
- эластомер на основе силикона (толщиной 0,127–0,254 мм). Хотя такие прокладки очень технологичны, они не столь хороши, как проводящие пасты и парафинированный алюминий. Однако при использовании наполнителя из окиси алюминия эластомер может быть эффективен, особенно когда площадь касания превышает 1 см² или поверхности не являются достаточно плоскими. Недобство: тепловое сопротивление эластомера зависит от давления, поэтому при неаккуратной сборке может произойти непредвиденное снижение теплопроводности, приводящее к вы-

ходу из строя мощных полупроводниковых приборов при работе в жестких условиях и в критическом режиме;

- более толстый слой эластомера на основе силикона (0,508–0,762 мм и выше), предназначенный для соединения грубо обработанных металлических деталей, где имеется большая вероятность возникновения зазоров и снижения теплопроводности. Недобство: относительно низкая эффективность передачи тепла, однако лучшая, чем у обычного воздуха;
- материалы, изменяющие свое физическое состояние. Такие материалы представляют собой специально изготовленные слоистые структуры из парафина или воска, выпускаемые в виде больших листов или специально нарезанных прокладок. После размещения прокладки между двумя металлическими поверхностями изделие нагревают до температуры 60–70 °С. Парафин тает и почти идеально заполняет микротрещины. Для плоских металлических деталей данный метод является лучшим, сравниться с ним может только пайка.

Компания Bergquist, около 25 лет выпускающая электроизолирующие и теплопроводящие материалы, на сегодняшний день способна предложить разработчикам материалы, не только не уступающие традиционным теплопроводящим пастам и керамике, но и позволяющие принципиально по-новому решать проблему отвода избыточного тепла. Рассмотрим основные классы материалов фирмы Bergquist.

Материалы семейства Sil-Pad предназначены для замены термопроводящих паст и керамических прокладок. Они производятся на стекловолоконной основе, заполненной силиконовым каучуком. Благодаря стекловолоконной основе материал устойчив к проколам и прочим механическим повреждениям при сильном прижме радиатора к корпусу прибора — прижимное усилие около 500 кг не повреждает материал. Силиконовый каучук с высокой теплопроводностью заполняет

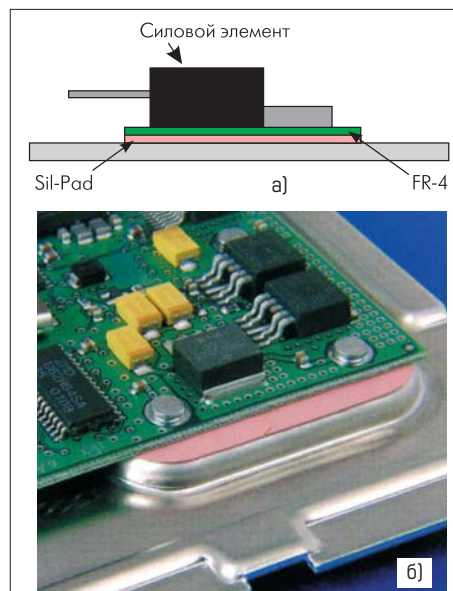


Рис. 4. Варианты применения материала Sil-Pad

все неровности микрорельефа поверхностей, повышая теплоотдачу. Существуют специальные материалы Sil-Pad для работы в условиях повышенной влажности. На рис. 4а и 4б показаны варианты применения данного материала.

В аппаратуре определенного вида, где нельзя применять кремнийсодержащие материалы (телекоммуникационные устройства или авиационно-космическое оборудование), разработана группа материалов Poli-Pad — в качестве основы в них использованы стекловолокно или диэлектрическая пленка, а силиконовый каучук заменен полистиролом.

Для применений, не требующих электроизоляции, компания Bergquist разработала материалы Q-Pad, представляющие собой алюминиевую фольгу, с двух сторон покрытую теплопроводным слоем силиконового каучука, или полимер с графитовым наполнителем на стекловолоконной основе.

Для СВЧ-применений компания Bergquist предлагает Sil-Pad Shield — медные пластины, ламинированные с двух сторон материалом Sil-Pad, имеющие вывод для заземления. Применение Sil-Pad Shield позволяет на порядок снизить уровень паразитного излучения.

Материалы группы Hi-Flow в основе состоят из алюминиевой фольги, покрытой полимером, остающимся в твердом состоянии при температуре до 65 °С, а при ее повышении размягчающимся и растекающимся по всей контактной поверхности. Если же изоляция необходима, фирма предлагает материалы Hi-Flow с пленочной и стекловолоконной изолирующими основами.

Особый интерес для разработчиков электронной аппаратуры представляют матери-

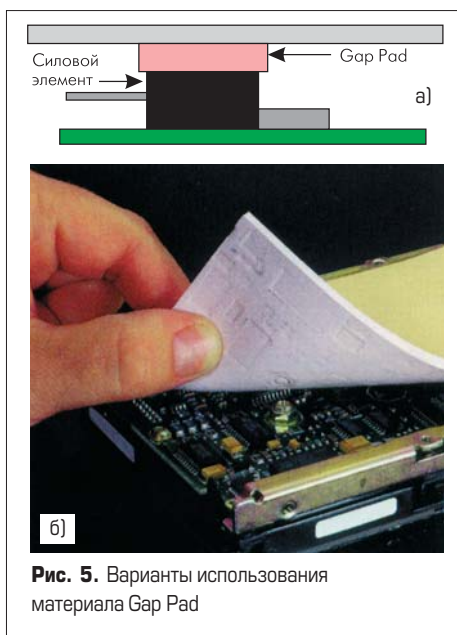


Рис. 5. Варианты использования материала Gap Pad

алы группы Gap Pad. Благодаря особому теплопроводному изолирующему полимеру, материал легко деформируется, плотно прилегая ко всем компонентам на печатной плате. Такие материалы могут служить прокладкой между печатными платами и теплорассеивающим элементом — металлическим корпусом устройства или радиатором.

На рис. 5а и 5б показаны варианты использования материала Gap Pad.

Из данного материала фирма Semikron применяет эластичные прокладки в интеллектуальных силовых IGBT-модулях SKiiP.

Если же свойств материалов Gap Pad окажется недостаточно, можно воспользоваться

продуктами группы Gap Filler. Это жидкие материалы, состоящие из двух компонентов, вулканизирующиеся при смешивании. Вулканизация происходит в течение нескольких часов при комнатной температуре либо в течение 5 минут при 100 °С.

Все выше рассмотренные материалы чаще всего применяются для теплоотвода от дискретных элементов на печатных платах, для обеспечения теплоотвода от DC/DC-конвертеров, силовых модулей и твердотельных реле на коммутлирующие токи не выше 10 А и т. д. Использование теплопроводящих материалов в применении к силовым модулям, функционирующим при больших значениях токов и напряжений, имеет свои особенности, описанные ранее.

Литература

1. Никитин В. Станут ли твердотельные реле альтернативой реле электромагнитным // Электронные компоненты. № 2'2004.
2. Родригес Э. Методы охлаждения DC/DC-конвертеров // Chip news. № 4'2004.
3. Thermal Solutions for surface mount power applications. Catalog products the Bergquist company. Netherlands. 2002.
4. Исламгазина Л. Технологические методы повышения надежности силовых модулей // Технологии в электронной промышленности. № 2'2005.
5. Колпаков А. SKiiP-интеллектуальные силовые модули IGBT фирмы Semikron // КиТ. №1 2003.
6. Hagenhoff Dirk, Passe Thomas. Fast mounting systems of low power IGBT modules // PCIM Europe. № 10'2002.