

Силовая электроника и сопромат

В условиях жесткой конкуренции производителю устройств силовой электроники недостаточно единожды завоевать популярность, зарекомендовав себя надежным и качественным поставщиком. Репутацию очень легко потерять из-за отказов выпускаемого оборудования. Как кажущиеся малозначимыми моменты технологических процессов производства могут повлиять на надежность выпускаемых изделий и как этого избежать, мы и рассмотрим в данной статье.

Сергей Ровенский, к. т. н.
brand@semikron.com.ua

Когда кому-либо задаешь вопрос: «А что же отличает силовую электронику от более привычной всем радиоэлектроники?» — собеседник обычно без особого напряжения вспоминает, что умозрительная линия раздела расположена где-то в области токов чуть выше 10 А. Более продвинутые, которые помоложе, могут рассказать, как вчетвером грузили тяжеленный преобразователь, а старший коллега ехидничал при этом: «Это вам не фитюльки какие-нибудь, а силовая электроника!». Средний студент-старшекурсник еще добавит, что для понимания отдельных процессов в силовых схемах требуются интеллектуальные усилия, а более одаренный вспомнит казавшиеся тогда ненужными разделы по тепловым процессам из курса «Общей физики».

Предлагаемая статья призвана напомнить, что прекрасная, сто раз проверенная и надежная схема, в которой внимательно проанализированы электромагнитные процессы, тщательнейшим образом выполнены тепловые расчеты, может на практике преподнести букет «сюрпризов». Причем эти «сюрпризы» проявятся и «порадуют» вас с той стороны, откуда их подчас никто не ожидает.

Основные показатели, которые используются в зарубежной литературе для характеристики надежности электронных устройств, — это FIT (Failure In Time — интенсивность отказов, подтвержденная статистическими данными) и MTBF (Mean Time Between Failure — средняя наработка на отказ):

$$FIT = \lambda = n_f / (N \times T), \text{ MTBF} = 1 / FIT,$$

где: n_f — количество обнаруженных отказов; N — количество одновременно испытываемых компонентов; T — время испытаний.

Влиять на эти показатели может масса причин, от совершенно экзотических, хотя и имеющих довольно точные численные значения (например, космическая радиация), до таких, которые описываются размытым термином «человеческий фактор», которому наш веселый народ подобрал много синонимов, самый безобидный из которых — «криворукость».

График зависимости частоты отказов от времени эксплуатации показан на рис. 1а. Эпюра, называемая кривой надежности, имеет три ярко выраженных участка. Первый, определяющий область ранних неисправностей, характеризуется спадом частоты отказов. Длительность и скорость спада зависят, в основном, от конструкции изделия, физико-химических свойств примененных материалов и уровня технологии. Статистические отказы в средней части графика имеют практически неизменную интенсивность — это время нормальной эксплуатации изделия. И, наконец, последняя область с возрастающей частотой отказов соответствует окончанию срока службы изделия. Для силовых полупроводниковых ключей исчерпание ресурса сопровождается лавинообразным ростом теплового сопротивления кристаллов,

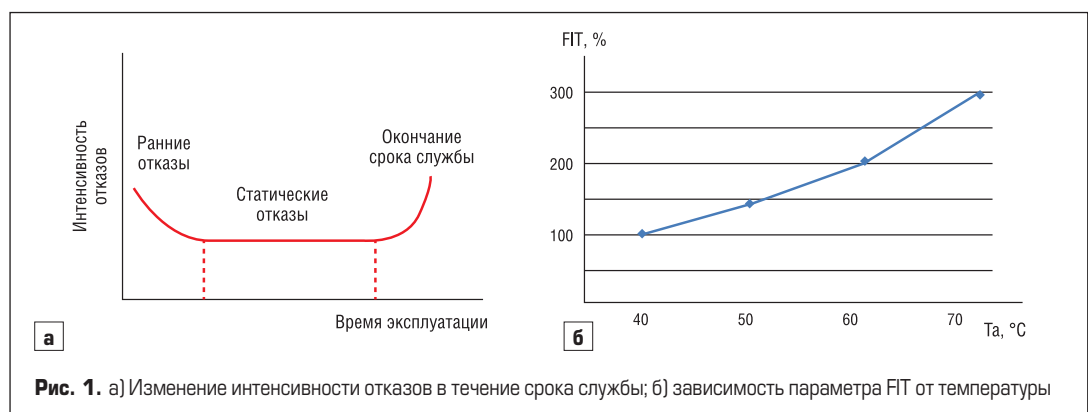


Рис. 1. а) Изменение интенсивности отказов в течение срока службы; б) зависимость параметра FIT от температуры

нарушениями электрических связей, потерей управляемости.

Мы уже писали о том, к чему приводит желание сделать «подешевше» и использовать явно контрафактные полупроводниковые приборы [6]. Но даже оригинальный модуль может преподнести неожиданный сюрприз, если упорно игнорировать классическое «не гонялся бы ты, поп, за дешевизной».

Один из крупных потребителей тиристорных модулей SEMIPACK3 SKKH323 пожаловался на резкое увеличение количества отказов по отношению к общей статистике (табл. 1) именно на начальном участке кривой (рис. 1а). Последовавшая проверка «адекватности» электрических режимов не вызвала сомнений в правильности выбора этого типа модулей. Точно так же правильными были расчеты тепловых режимов с использованием программы теплового моделирования SEMISEL, которая выдавала для этой схемы радующий глаз разработчика вывод «This configuration work fine». Но количество вышедших из строя за короткое время модулей никак не коррелировало с расчетными показателями предполагаемого количества отказов за год для компонентов, которые эксплуатируются 220 дней в году по 8 ч в сутки (табл. 2), т. е., в течение года в среднем лишь один (!) из более чем 11 тыс. модулей должен выйти из строя! Однако существует ряд факторов, которые не могут быть учтены ни одним программным средством расчета. Успех проекта, как и раньше, во многом зависит от знаний, опыта и даже интуиции разработчика, но, к сожалению, не всегда!

Через некоторое время похожая история повторилась и у другого крупного заказчика, но с тиристорными модулями SEMIPACK3 SKKT273, которые конструктивно схожи с SKKH323 тем, что также содержат две большие DCB-платы, два больших кристалла 25×25 мм (расположение силовых чипов приведено на рис. 2), а DCB-плата и кристаллы размещены близко с крепежным отверстием.

Как обычно, опираясь на собственный опыт, специалисты рассматривают массу предвари-



Рис. 2. Расположение кристаллов в модулях: а) SKKH323; б) SKKT273

тельных версий появления неисправностей. Поскольку поведение модулей при подаче силового напряжения выглядело несколько странным, а процесс напоминал явление «самопроизвольного отпираания», в качестве рабочих были приняты две гипотезы:

1. Накопление ионов воды, могущее привести к изменению диаграммы силовых линий поля как в барьерном слое между полупроводником и защитным компаундом, так и в полиамидном изолирующем слое чипов (при этом могут происходить и электролитические процессы) [3].

2. Использование в схеме формирования сигнала управления оптосимисторов, обладающих низким допустимым значением dU/dt , что, как следствие, приводит к неустойчивой работе каскада управления и частым ложным срабатываниям из-за наличия помех.

Алгоритмы выявления причин неисправности у компаний, занимающихся производством силовых модулей, достаточно схожи. В SEMIKRON этот процесс организован в такой последовательности:

- При выходе из строя элемента заказчик составляет акт отказа, в котором указывает характер неисправности, расчетные и, по возможности, реальные режимы работы, приводит принципиальную схему изделия (схему подключения модуля или драйвера).
- Данный документ и поврежденные детали отправляются на головной завод SEMIKRON в Нюрнберге, где они попадают в специальный отдел, занимающийся анализом и выяснением причин неисправности.
- В течение 2–4 недель специалисты компании составляют подробный протокол, где указывают возможные сценарии отказа и дают соответствующие рекомендации.
- Если же причину установить не удастся, то выход из строя классифицируется как случайный, информация о нем поступает в отдел надежности и используется для уточнения параметра FIT.

Естественно, претензии принимаются только тогда, когда компоненты приобретены по официальным каналам.

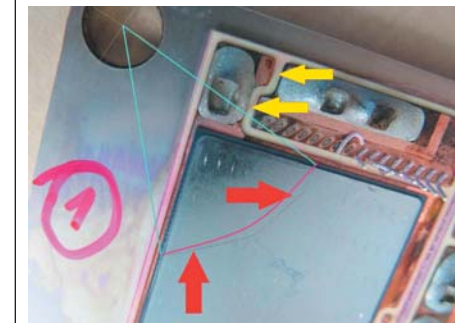
В большинстве случаев с высокой степенью вероятности удастся выяснить, какие факторы повлекли за собой повреждение силового модуля или драйвера. Чаще всего причиной оказывается несоблюдение правил проектирования и монтажа, а также ошибки в тепловых расчетах. Поскольку в обоих случаях заказчики получали модули по каналам официальной

дистрибуции, то последующий процесс анализа проводился на заводе-производителе.

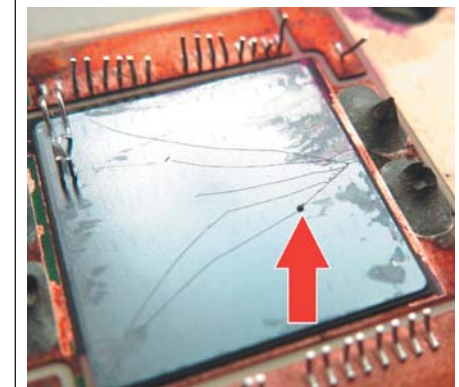
Электронщикам даже во времена развитого социализма не читался курс сопромата, поэтому утверждение, что «напряжения и деформа-



Концентрические трещины в керамической DCB-подложке, проявившиеся после купания в красителе



Концентрическая трещина в кремниевом силовом чипе, видимая невооруженным глазом



Трещины в кремниевом чипе, приведшие к электрическому пробоя (черная точка)

Рис. 3. Примеры повреждений кремниевых кристаллов и подложек

Таблица 1. Статистические показатели надежности модулей SEMIPACK

Линейка продукции	Показатель FIT ($\times 10^{-9}$)	MTBF ($\times 10^8$ час)
SEMIPACK 1	70	0.14
SEMIPACK 2	50	0.2
SEMIPACK 3	50	0.2
SEMIPACK 4	50	0.2
SEMIPACK 5	50	0.2

Таблица 2.

	Величина
Время работы за год t_{oper}	$220 \times 8 = 1760$ ч
$FIT = 1/MTBF$	$50 (\times 10^{-9} \text{ ч}^{-1})$
$N_f = FIT \times t_{oper} \times 100\%$	$50 \times 10^{-9} \times 1760 \times 100\% = 0,0088\%/год = 88 \text{ ppm}$
Количество компонентов, работающих в течение года без отказов $n_s = MTBF / t_{oper} - 1$	$0,2 \times 10^8 / 1760 = 11363$



Вязкая паста при монтаже не выдавливается из зазора

а



Неравномерность слоя (комковатость)

б



Как должно быть при использовании пасты рекомендованной вязкости

в

Рис. 4. Теплопроводящая паста: «как быть не должно» и «как надо»

ции взаимосвязаны законом Гука», остается для большинства из них тайным знанием. Кроме этого, любимый лозунг «Механика — ничто, электричество — все!» заставляет рассматривать параметр «напряжение» только с точки зрения Максвелла как нечто, создаваемое токами смещения. А дальше к месту вспомнился медицинский анекдот: «Доктор, а я жить-то буду? — Вскрытие покажет...».

И те «картины», которые проявились после «вскрытия», поначалу несколько обескуражили. Предварительные гипотезы были отброшены, как возможные, но не в описываемых случаях. Самые яркие и характерные иллюстрации приведены на рис. 3. Они были сделаны в исследовательской лаборатории SEMIKRON после предварительного удаления пластмассы корпусов, силовых и сигнальных терминалов, слоя защитного силиконового геля и смывки молибденового напыления.

Теперь самое время электронщику, обратиться к упомянутому «тайному знанию», что напряжение бывает не только электрическим, но и механическим. С тем фактом, что превышение допустимого электрического напряжения приводит к электрическим и последующим вторичным проблемам, и для недопущения такого превышения используются демпфирующие цепи, будущих электронщиков знакомят в вузах. Максимально допустимые значения предельного напряжения, пикового тока и температуры кристалла, приводимые в спецификациях, не должны быть превышены ни при каких условиях эксплуатации, включая перегрузочные, иначе потребитель получит устройство, которое будет «как две капли воды похоже на настоящее, а включаешь — не работает». А вот те болез-

ненные эффекты, которые механическое напряжение может «творить» с очень сложной многослойной неоднородной структурой, которую являет собой изолированный силовой модуль, к сожалению, приходится многим познавать чисто марксистско-ленинским методом — т. е. на практике.

«Благими намерениями вымощена дорога в ад»?! Тому свидетельство — первый случай, в котором желание заказчика использовать более дешевую и, как потом оказалось, более вязкую теплопроводящую пасту (рис. 4а), экономия на специальных инструментах (как правильно делать, см. в [5]) и привычное нежелание тратить время на прочтение каких-то там инструкций [1, 2] вызвало к жизни цепочку событий:

- более вязкая паста легла более толстым и неравномерным слоем (рис. 4а), потому что не была использована специальная оснастка;
- толстый слой вызвал ухудшение теплопередачи;
- похвальное желание монтажника сделать слой тоньше вынудило его сильнее затянуть крепежные болты;
- отсутствие контроля усилия затягивания (вот она, силовая электроника!) привело к недопустимым механическим напряжениям;
- неравномерность слоя (рис. 4б) вызвала появление дополнительных центров концентрации механических напряжений.

А уже эта цепочка, в полном соответствии с законом Гука, привела к плачевным результатам.

Коэффициенты пластической деформации керамики (вот он, сопромат!) на порядки отличаются от этих же коэффициентов

для пластичных металлов (медь), из которых выполнено основание. Если установленный на охладитель с несоблюдением инструкций [1, 2] силовой ключ не вышел из строя практически мгновенно, то недостаточная толщина слоя теплопроводящего материала и наличие воздушных пузырей приведет к локальному перегреву и сокращению срока службы силового ключа. Избыток же пасты не только способствует увеличению теплового сопротивления, но и может вызвать повреждение керамической подложки при затягивании крепежных винтов. Кремний также нельзя назвать пластичным, поэтому он трескается ничуть не хуже керамики DCB. На рис. 4в видны зоны прямого контакта «металл–металл» на краях и вблизи крепежных отверстий модуля, где прижимающее усилие максимально. Поэтому очень нежелательным является превышение усилий затягивания крепежных элементов типа «болт–гайка» по отношению к величинам, указанным производителем. Для различных типов корпусов SEMITRANS такие величины приведены в таблице 3. Кроме этого, для каждого типа силового ключа оптимальное значение толщины слоя и требования к качеству обработки радиатора указываются в технической документации (Datasheets, Application Notes, Mounting Instructions, Technical Explanation).

Термопасту можно наносить на базовую плату модуля или на радиатор, но в этих случаях обязателен регулярный контроль параметров слоя с помощью специального измерительного инструмента. Оптимальные характеристики TИМ различны для разных типов модулей, радиаторов, а также вариантов сборки. Именно поэтому в инструкции по монтажу силовых модулей приводятся требования по толщине слоя и качеству обработки поверхности теплоотвода. В большинстве случаев рекомендуется проведение следующей процедуры:

1. На модуль наносится паста с различной, заранее определенной толщиной слоя.
2. Модуль устанавливается на теплосток в соответствии с руководством по применению. При затяжке крепежных винтов следует соблюдать требования, указанные в инструкции по монтажу.

Таблица 3. Допустимые механические усилия для модулей SEMITRANS

Корпус	Крепление к радиатору		Силовые терминалы	
	Резьба	Усилие, Нм	Резьба	Усилие, Нм
SEMITRANS M1	M6	4–5	M5	2,5–3,5
SEMITRANS 2	M6	3–5	M5	2,5–5
SEMITRANS 3	M6	3–5	M6	2,5–5
SEMITRANS 4	M6	3–5	M4	1,1–2
			M6	2,5–5
SEMITRANS 6	M6	4–5	пайка	–
SEMITRANS 10	M6	3–6	M8	8–10

3. Для достижения снятия механических напряжений установленный модуль должен пройти три термических цикла с градиентом 20–100 °С длительностью 1 ч.
4. После сборки и механической релаксации термопаста равномерно распределяется в зазоре. Далее необходимо провести демонтаж модуля, однако если он не имеет базовой платы, то снятие его с теплостока может привести к повреждению корпуса. Для неразрушающего демонтажа после удаления крепежных элементов сборку следует выдержать при комнатной температуре в течение 12 ч или провести один-два цикла «нагрев–охлаждение». После этого остатки пасты могут быть легко удалены с помощью чистого, неворсистого материала без применения растворителей (в некоторых случаях процесс очистки оговаривается в документации производителя паст).

Как ведет себя в работе кристалл с механическими повреждениями — тема отдельного исследования, а как выявить признаки таких повреждений, избежав умышленного вскрытия модуля, задача сама по себе интересная...

Грамотные специалисты, работающие в области силовой преобразовательной техники, прекрасно понимают, что тщательно выполненный тепловой расчет является одним из основных этапов разработки, который и позволяет оценить надежность изделия в различных условиях эксплуатации. Однако свести на нет все затраченные усилия могут кажушиеся на первый взгляд второстепенными качество обработки радиатора и процесс нанесения теплопроводящей пасты. Поэтому совершенно необходимо уделять самое пристальное внимание и технологическим моментам, и обучению персонала, выполняющего монтаж. При нанесении теплопроводящих паст в производственных условиях необходимо очень жесткое соблюдение технологических норм, позволяющее исключить появление воздушных пустот (минимальный предел) или отсутствие зон контакта «металл–металл» (максимальный предел) при установке силовых п/п модулей на охладитель. Очевидно, что для получения требуемых тепловых характеристик необходимо, чтобы качество обработки поверхности радиатора и момент затяжки крепежных винтов соответствовали требованиям спецификаций. Их нарушение ведет к механическим повреждениям внутри модуля, увеличению теплового сопротивления, перегреву и в конечном итоге — отказу или сокращению срока службы изделия.

Умозрительная линия раздела между силовой и более привычной всем «слаботочной» радиоэлектроникой расположена где-то в области токов выше 10 А. И трассировать такие токи приходится уже не дорожками толщиной 50 мкм на печатной плате, а токоведущими шинами, отверстия в которых выполняются тоже не сверлышком Ø1. Несовпадение отверстий в шине, попытка совместить которые привычным воздействием «ломиком подпернем, кувалдочкой

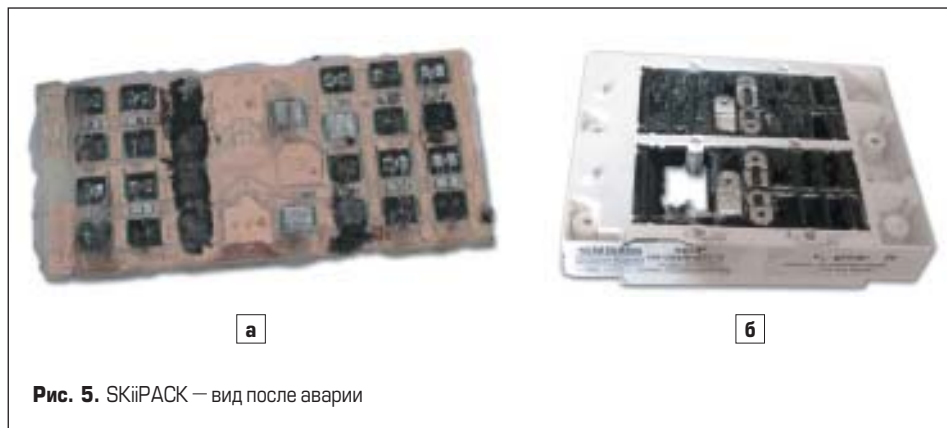


Рис. 5. SKiiPACK — вид после аварии

подправим», с соответствующими отверстиями в силовых терминалах модуля создает в шинах и терминалах модулей статическую нагрузку на выводах. Такая нагрузка в совокупности с термическим удлинением шин при нагреве способна испарить даже «интеллигентность» сборок типа SKiiPACK (рис. 5).

А несоблюдение инструкций по проектированию и монтажу может обернуть в проблему явное преимущество SKiiPACK — отсутствие базовой платы (DCB-подложка на рис. 5а прижимается непосредственно к радиатору, чем достигается ощутимое улучшение стойкости к термоциклированию). Явный сопромат налицо. Казалось бы, ну какое может быть удлинение медной шины от нагрева при протекании по ней номинального тока и изменения температуры внутри шкафа на 40 °С (вполне обычный расчетный температурный диапазон). Однако линейные размеры меняются вполне ощутимо — примерно на 0,935 мм на одном метре. Если шина с одного конца свободна, то температурные деформации не стеснены и никаких дополнительных нагрузок не будет. Если же шина закреплена с двух сторон, т. е. находится в сжатом состоянии, то на силовой контакт модуля будет действовать усилие, которое определяется формулой:

$$N = E \times S \times \alpha \times \Delta T,$$

где: E — модуль упругости меди ($1,1 \times 10^5$), α — коэффициент линейного расширения меди ($17 \times 10^{-6} \times C^{-1}$), S — площадь попереч-

ного сечения шины, ΔT — разность температур.

Любопытный читатель может сам считать давление шины сечением, например, 50 мм² на терминал модуля SKiiPACK и сравнить его с максимально допустимым по продольной оси (величина $F_{+x/-x}$ в [7]). А после этого обратиться к «тайному знанию», которое ведомо знатокам сопромата, что напряжение бывает не только электрическим, но и механическим. Для случая, приведенного на рис. 5б, это давление превысило предельно допустимое значение, и возросшее с нагревом напряжение нарушило прижимной контакт с DCB на рис. 5а со вполне прогнозируемым результатом. Поэтому если нет возможности использовать гибкие плетеные шины хотя бы на этапе «последних сантиметров», то при проектировании конструкции силовой части (рис. 6) необходимо обратить внимание на следующее:

1. Изолирующая крепежная стойка (смонтированная на раме или ввинченная прямо в радиатор) служит развязкой от внешних усилий.
2. Сборная шина из тонких медных листов дает большую гибкость.
3. Изгиб в ламинарной шине постоянного тока минимизирует горизонтальные перемещения конденсаторной батареи, которые не могут быть прямо приложены к терминалам модуля.
4. Прорези в металлических частях шин (рис. 7) постоянного тока увеличивают гибкость (обратите внимание на то, что

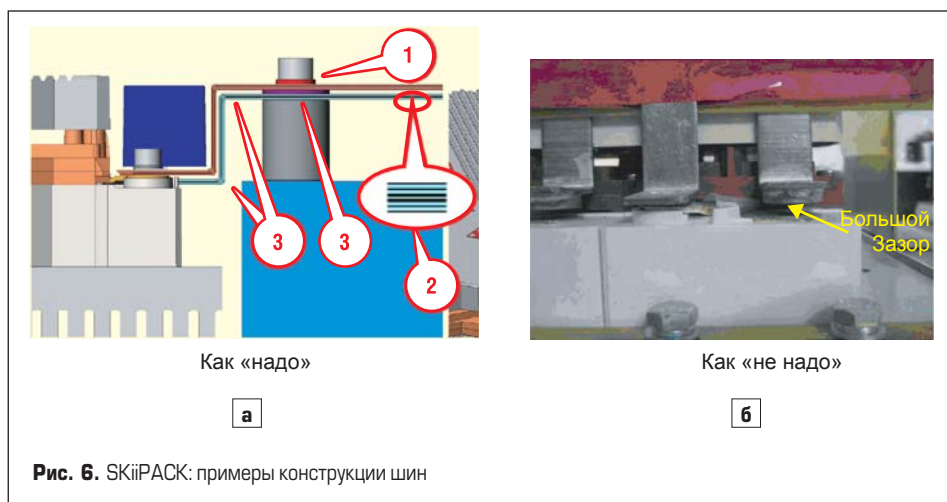


Рис. 6. SKiiPACK: примеры конструкции шин



Рис. 7. Прорези для уменьшения механических напряжений в шине

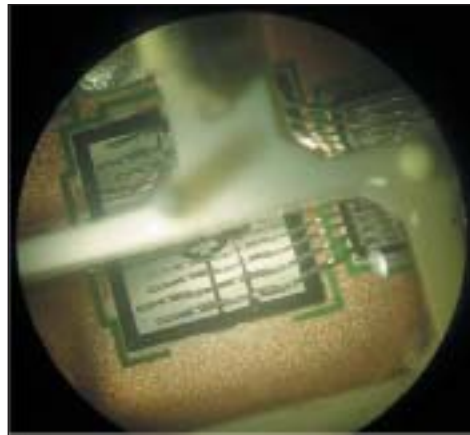
щели могут увеличить температуру клеммы ввиду более высоких потерь на проводимость).

Если имеется несколько блоков SKiP, присоединенных к одной батарее DC-конденсаторов (например, схема трехфазного инвертора), то такие гибкие соединения с подводящими шинами желательно разместить на каждом радиаторе.

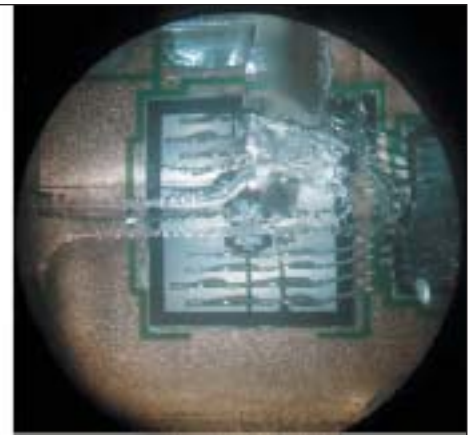
Самая лучшая итальянская паста готовится из твердых сортов пшеницы с нужным содержанием клейковины. Если для помола использовать фуражное зерно, паста из такой муки при варке расплзется и слипнется комками. Так и в случае теплопроводящей пасты. Высокая вязкость или наличие неоднородностей может привести к тому, что маленький комочек окажется вблизи геометрической оси модуля при его установке на поверхность охладителя. И тут уже для вывода модуля из строя не нужно прилагать механических сверхусилий. Среди IGBT-модулей особенно чувствительными к нарушению инструкций по монтажу оказались модули SEMiX, особенно в корпусе 4-го типоразмера (основание 182×69 мм). На рис. 8 приведены фотографии разрушенного кристалла модуля SEMiX604GB12E4s. Микротрещина на кристалле заметна (рис. 8а), но ее направление скрыто под слоем медного напыления на керамике DCB. След вторичного пробоя, вызванный наличием трещины в кремнии, виден на рис. 8б.



Рис. 9. Модуль SEMiX с нанесенным теплопроводящим материалом с изменяемым фазовым состоянием



а



б

Рис. 8. Разрушенный кристалл модуля SEMiX604GB12E4s

Коэффициент пластической деформации керамики на порядки отличается от этого же коэффициента для меди, из которой сформовано основание. Кремний тоже нельзя назвать пластичным, так как он трескается ничуть не хуже керамики DCB. Избыток же пасты не только способствует увеличению теплового сопротивления, но и может вызвать повреждение керамической подложки при затягивании крепежных винтов. Хотя проблему, связанную с нанесением термопасты, возможно решать априори, пользуясь технологиями, предоставляемыми производителями силовых модулей, в т. ч. SEMIKRON. Например, для новейших модулей SEMiX серии E4r в качестве опции предлагается нанесение теплопроводящего материала с изменяемым фазовым состоянием (Phase Change Material, PCM) HALA TPCZPCP8 (рис. 9).

Теплопроводящие структуры PCM отличаются высокой теплопроводностью и простотой применения. При комнатной температуре такой материал находится в твердом состоянии, переход его в жидкую фазу происходит при нагреве. Это позволяет безопасно транспортировать компоненты с нанесенным слоем, который разжижается и заполняет зазор между базовой платой и радиатором в процессе естественного нагрева (при эксплуатации или испытаниях силовых модулей).

От обычных термопаст с силиконовым носителем и металлоксидным наполнителем PCM отличается более высокой теплопроводностью (примерно в три раза) и меньшим значением теплового сопротивления ($R_{th(c-s)}$ — до 30%, $R_{th(j-s)}$ — до 15%). При нормальной температуре PCM представляет собой твердую субстанцию, поэтому риск его загрязнения или повреждения гораздо ниже, чем при использовании обычной термопасты. Однако это, в свою очередь, обуславливает более жесткие требования по последовательности и моменту затяжки крепежных винтов при монтаже «безбазовых» модулей, поскольку возрастает риск повреждения керамической DCB-подложки.

При нанесении ТИМ в заводских условиях применяются очень жесткие технологические нормы, исключающие появление воздушных пустот (минимальный предел) или отсутствие зон контакта «металл–металл» (максимальный предел). Соблюдение столь точных допусков может быть достигнуто только при полностью автоматизированном контроле с использованием новейших оптических измерительных средств.

Однако есть проблемы, которые производитель напрямую решить не способен. Никакой уровень технологии не спасет от устоявшихся привычек, характеризующих народную мудрость «Що занадто — то нездорово!» (с украинского это можно перевести, например, как «переедание вредит здоровью» — прим. редактора). Специалисты по проектированию прекрасно понимают технический английский, поэтому если в Application Manual [8] написано, что для крепления шин нужно применять инструмент с контролируемым усилием затягивания, то они вряд ли будут заниматься самостоятельностью. Да и зачем? «А мы всю жизнь обходились без него (инструмента, внешне похожего на динамометрический ключ)!» — уверенно говорит монтажник старой закалки... «Такой ключ ведь дорогой, еще слома-

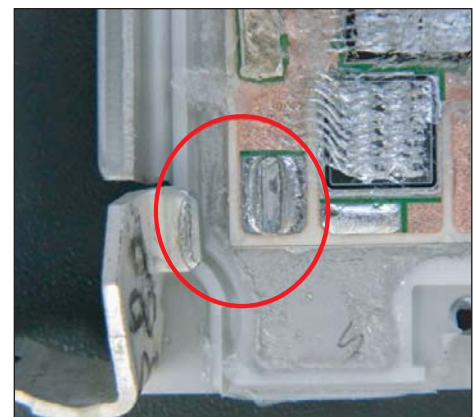


Рис. 10. Выломанный терминал модуля SEMiX904GB126Ds

ют», — вторит этому монтажнику руководство завода. Да вдобавок на шайбочке еще сэкономили. Пренебрежение рекомендациями приводит к тому, что специалисты по анализу отказов скучают, поскольку для понимания того, почему отломался терминал (рис. 10) модуля SEMIX904GB126Ds, дорогое оборудование немецкой лаборатории не нужно.

Умный учится на ошибках других, поэтому знает, что сто раз проверенная и надежная схема, в которой детально проанализированы электромагнитные процессы, тщательнейшим образом выполнены тепловые расчеты, сама не способна на практике преподнести «нежданчики». Эти «нежданчики» приходят в гости именно с той стороны, куда возможности программ моделирования не простираются.

Как показывают статистические данные, при нарушениях правил монтажа процент отказов модулей SEMIPACK 3 (рис. 11а) выше, чем SEMITRANS 3 (например, SKM400GB12E4, рис. 11б). Но ничего удивительного в этом нет, модуль SEMITRANS 3 (SKM400GB12E4) имеет на базовой плате:

- четыре DCB-платы меньшей площади;
- восемь кристаллов (12×12 мм);
- кристаллы расположены дальше от крепежных отверстий, чем у SEMIPACK.

Однако для SEMITRANS 3 (как и для любых других) не менее актуальным остается контроль по недопущению превышения усилий затягивания крепежных элементов типа «болт-гайка» по отношению к величинам, указанным производителем в Datasheet на каждый типонаименование модуля в серии. Для различных типов корпусов SEMITRANS SEMIKRON такие величины сведены в таблицу 3.

Кроме этого, для каждого типа силового ключа оптимальное значение толщины слоя теплопроводящей пасты и требования к качеству обработки радиатора указываются в технической документации [9].

Исследование основной массы случаев выхода из строя силовых полупроводниковых приборов, определение нарушений, повлекших за собой повреждение силового модуля или драйвера, есть задача средней степени сложности. Чаще всего причинами оказываются несоблюдение правил проектирования и монтажа и ошибки [10] в тепловых расчетах. Заказчики, получающие модули по каналам официальной дистрибуции, осведомлены о том, что процесс анализа вышедших из строя полупроводниковых приборов проводится на заводе-производителе. В лаборатории анализа отказов SEMIKRON накоплена огромная база различных сценариев выхода из строя силовых модулей. Интересно, что 90% проблем, связанных с нарушением правил монтажа, возникают в Восточной Европе и Китае. Это неудивительно — наши люди, как и китайцы, люди творческие, пытливые, любящие нетрадиционные решения. Скучные немцы с их нудными инструкциями используют

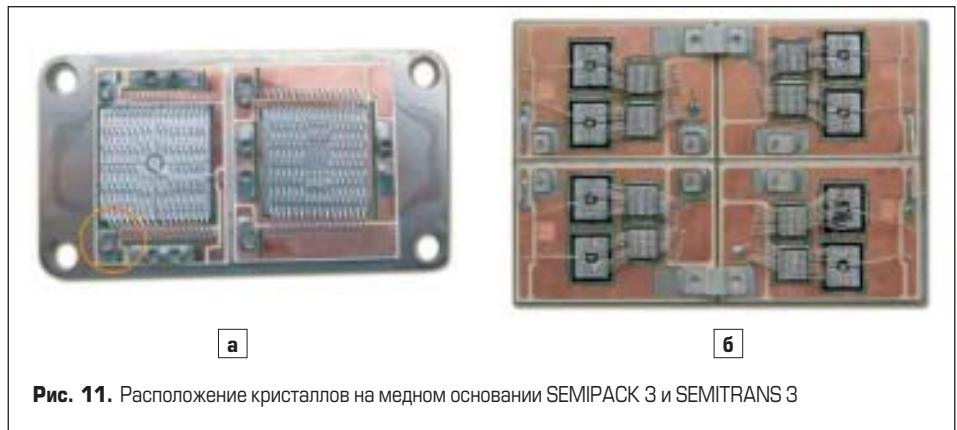


Рис. 11. Расположение кристаллов на медном основании SEMIPACK 3 и SEMITRANS 3

только рекомендованные типы паст, несут их с соблюдением рекомендованной толщины слоя, а потом монтируют модули с применением рекомендованного крепежа, соблюдая моменты и последовательность затяжки. Однако как в предыдущем, так и в описанном далее (совершенно курьезном) случае дорогостоящее оборудование немецкой лаборатории простаивало. Как полагаете, что делает наш человек, если у него кончаются винты нужной длины? Правильно — он берет винт подлиннее и закручивает его покрепче (да и мудрость народная подсказывает: «Чуть длиннее, чуть короче — какая разница»). А потом потрясенные специалисты в лаборатории анализа отказов SEMIKRON наблюдают картину, показанную на рис. 12. В этом модуле даже не пришлось проверять его электрические характеристики, достаточно было заглянуть в него через отверстие терминала 3 «вооруженным глазом». Особенно впечатляет фото, сделанное через отверстие для крепежного винта силового терминала, людей тонкой душевной организации. Длинный винт прошел весь модуль, сломал пластиковые элементы корпуса и разворотил кристалл IGBT вместе с его выводами и медным напылением подложки!

Кроме всего, известное правило: «...в одну воронку дважды...» не сработало, поскольку

этот модуль IGBT «проковыряли» те же люди, которые наломали подложки у тиристорных SKKH323.

Заключение

Опытные специалисты по силовой преобразовательной технике прекрасно понимают, что тщательно выполненные расчеты (тепловых и электромагнитных процессов в первую очередь) являются одним из основных этапов разработки, который и позволяет оценить надежность изделия в различных условиях эксплуатации. Однако свести на нет все затраченные ресурсы могут кажущиеся на первый взгляд второстепенными качество обработки радиатора, конструкция токоведущих шин и процесс нанесения теплопроводящей пасты [11]. Поэтому совершенно необходимо уделять самое пристальное внимание и технологическим моментам, и обучению персонала, выполняющего монтаж. При нанесении теплопроводящих паст в производственных условиях необходимо очень жесткое соблюдение технологических норм, позволяющее исключить появление воздушных пустот (минимальный предел) или отсутствие зон контакта «металл-металл» (максимальный предел) при установке силовых п/п модулей на охладитель. Очевидно, что для получения требуемых тепловых характеристик необходимо, чтобы качество обработ-



Рис. 12. Длинный крепежный винт прошел весь модуль, сломал пластиковые элементы корпуса и повредил кристалл IGBT

ки поверхности радиатора и момент затяжки крепежных винтов соответствовали требованиям спецификаций. Их нарушение ведет к механическим повреждениям внутри модуля, увеличению теплового сопротивления, перегреву и, в конечном итоге, отказу или сокращению срока службы изделия.

Теплопроводящие материалы всегда будут необходимы при монтаже стандартных модулей, и оптимальным решением здесь является использование паст с изменяемым фазовым состоянием (PCM), наносимых в условиях предприятия-изготовителя. Это позволит упростить и удешевить процесс монтажа модулей, исключить связанные с этим ошибки, обеспечить высокую повторяемость тепловых характеристик.

Литература

1. Mounting Instruction SEMIPACK. www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikronmountinginstructionsemipacken20150710rev01
2. Technical Explanation SEMIPACK. www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-technical-explanation-semipacken20150710rev02
3. Application Manual Power Semiconductors. ISLE Verlag, 2011. SEMIKRON International 2011.466p.
4. Колпаков А. Мифы и легенды российских электронщиков // Компоненты и технологии. 2007. № 9. с.150–156.
5. Колпаков А. Теплопроводящая паста — это действительно важно! // CHIP NEWS Украина. 2010. № 10. с. 54–57.
6. Гладских А. «...Люблю халяву я... А кто ее не любит...» // CHIP NEWS Украина. 2015. № 4.
7. Modules — Application Notes — SkiIP by SEMIKRON. 2004-11-15.
8. Application Manual Power Semiconductors (2nd edition) www.semikron.com/dl/servicesupport/downloads/download/semikron-application-manual-power-semiconductors-englishen-2015.pdf
9. Application Manual Power Semiconductors. ISLE Verlag, 2011. SEMIKRON International 2011.466p.