

Возвращаемся к термопасте

О применении теплопроводящих материалов (Thermal Interface Material, TIM) написано много статей и руководств по эксплуатации, однако эта проблема продолжает привлекать внимание специалистов, работающих в сфере производства электронной техники. Требования, связанные с качеством обработки поверхности радиатора и нанесения термопасты, ужесточились с появлением силовых ключей без базового (медного или композитного) несущего основания (SKiM, MiniSKiIP). Их разработка позволила резко повысить надежность и улучшить тепловые характеристики преобразовательных устройств. Чтобы полностью реализовать возможности «безбазовых» модулей, процесс нанесения TIM должен выполняться особенно тщательно. Известно, что немалое число отказов при эксплуатации силовых модулей связано с нарушением правил применения термопаст. Большой интерес также вызывает появление новых технологий и материалов с изменяемым фазовым состоянием, а также возможность их нанесения предприятием — изготовителем модулей.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Зачем нужна термопаста?

Потери, генерируемые полупроводниковыми кристаллами в процессе работы, приводят к повышению их температуры, снижению производительности и надежности работы системы. Чтобы исключить перегрев и рассеять тепло, выделяемое электронными компонентами, необходим радиатор.

Эффективность теплообмена между базовой платой или изолирующей подложкой силового модуля и радиатором зависит от качества сопрягаемых поверхностей, которые неизбежно имеют некоторую шероховатость и неравномерность. Как следствие, в зоне сопряжения образуются воздушные полости, препятствующие прямой передаче тепла (теплопро-

водность воздуха очень низкая — $\lambda_{\text{air}} \approx 0,03$ Вт/м·К, рис. 1).

Для улучшения качества теплопередачи воздушные полости заполняются TIM, как показано на рис. 2.

В состав TIM входит пластичный носитель (например, силиконовая паста) и теплопроводящий наполнитель (оксид цинка, графит или серебро). На рынке эти материалы предлагаются в виде паст, клеев, субстанций с изменяемым фазовым состоянием и пленок. Теплопроводность промышленных паст (λ) находится в диапазоне 0,5–6 Вт/м·К, т. е. по этому показателю они примерно в 20–200 раз лучше, чем воздух.

Для оценки вклада TIM-слоя в общие характеристики силовой сборки в таблице 1 приведены параметры основных материалов, используемых в полупроводниковых модулях. В качестве примера использована широко известная термопаста P12 компании Wacker. Значения тепловых сопротивлений R_{th} рассчитаны для типовых условий работы охлаждающей системы.

По сравнению с другими компонентами «тепловой системы» (табл. 1) паста имеет наихудшие характеристики, поэтому необходимость ее использования можно рассматривать как «неизбежное зло». Вклад TIM в суммарное значение теплового сопротивления «кристалл–радиатор» $R_{th(j-s)}$ модуля составляет около 20–65% в зависимости от типа модуля и параметров системы охлаждения. Поэтому слой пасты должен быть как можно тоньше, при этом минимально допустимое значение ограничено размерами воздушных полостей (рис. 3). Отметим, что применение материала с более высокой удельной теплопроводностью не приводит к значительному улучшению, поскольку обычно при этом приходится увеличивать толщину слоя.

Первая (красная) зона графика на рис. 3 характеризуется высоким значением $R_{th(c-s)}$ вследствие

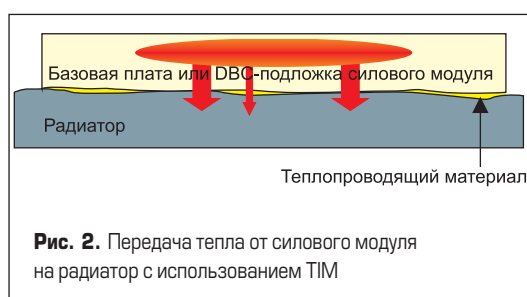
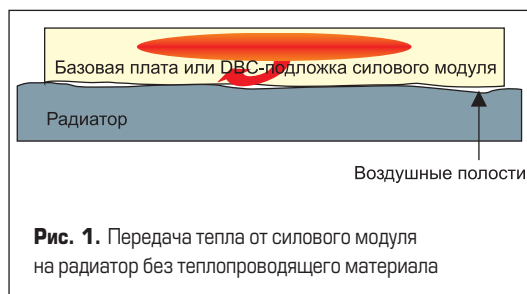


Таблица 1. Теплопроводность основных материалов силовых полупроводниковых модулей

Материал	Удельная теплопроводность λ , Вт/м·К	Толщина, мкм	Соотношение R_{th} , %
Кристалл	106	120	2,92
Паяный слой чипа	57	70	3,65
DBC (омеднение)	394	300	1,94
DBC (Al_2O_3)	24	380	32,91
DBC (омеднение)	394	300	1,31
Теплопроводящая паста (Wacker Chemie P12)	0,81	30	57,26

Примечание: частицы наполнителя (ZnO) Wacker P12 имеют диаметр 0,04–4 мкм, что позволяет формировать очень тонкий и равномерный слой.

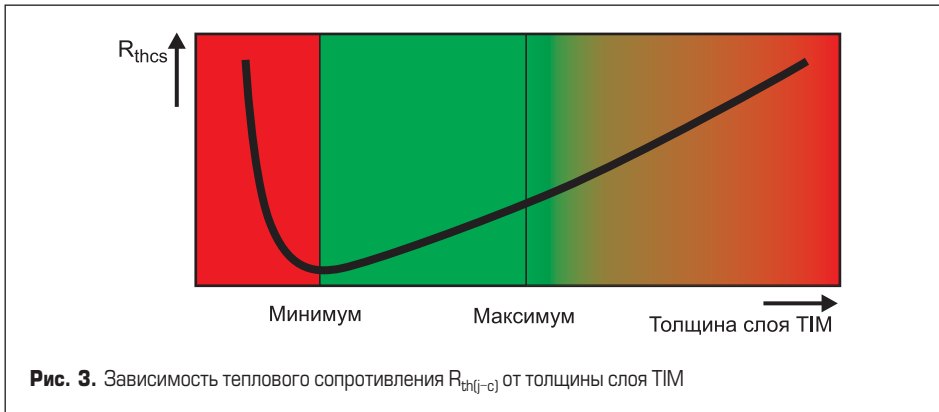


Рис. 3. Зависимость теплового сопротивления $R_{th(j-c)}$ от толщины слоя ТИМ

недостаточного заполнения термопастой воздушных полостей в зазоре между модулем и радиатором. После достижения оптимума тепловое сопротивление снова быстро растет пропорционально увеличению толщины слоя, поскольку теплопроводность ТИМ хуже, чем у других материалов силового полупроводникового модуля.

Внешний вид кривой, представленной на рис. 3, отличается для каждого типа модуля и радиатора, ее конкретный вид должен определяться в процессе тестирования. Оптимальная толщина слоя термопасты также не одинакова для разных типов модулей, вот почему в инструкциях по монтажу даются рекомендации по нанесению ТИМ и требования по качеству обработки поверхности радиатора.

Теплопроводящая паста P12 от компании Wacker широко используется и рекомендуется компанией SEMIKRON. Высокое качество этого материала подтверждается следующими ключевыми факторами:

- Измерения величины R_{th} показали, что теплопроводность ТИМ в реальных применениях зависит не только от удельного

показателя λ , но и от структуры материала (табл. 2). Чем больше частицы наполнителя (размеры которых определяют минимальную толщину слоя), тем выше удельная теплопроводность. После нескольких температурных циклов паста P12, имеющая мелкозернистую структуру (размер частиц P12 составляет 0,04–4 мкм), обеспечивает необходимый контакт «металл–металл» в точках с высоким усилием прижима, что приводит к существенному снижению $R_{th(c-s)}$.

- P12 обладает высокой устойчивостью к «текучести» и «высыханию», она сохраняет свои свойства в широком диапазоне температур в течение всего срока службы. Это подтверждается более чем 15-летним опытом эксплуатации модулей SKiIP в ветроэнергетических установках. Для примера на рис. 4 показано, как может измениться структура «обычной» термопасты при воздействии термомеханических напряжений в течение нескольких лет.

В таблице 2 представлены основные характеристики наиболее популярных тепло-



Рис. 4. Изменение структуры ТИМ при воздействии термомеханических напряжений (паста превратилась в жидкий гель и вытекла из зазора)



Рис. 5. Нанесение пасты с помощью резинового ролика

проводящих материалов, протестированных SEMIKRON.

Применение теплопроводящих материалов

Термопасту можно наносить на базовую плату модуля (самая распространенная технология) или на радиатор. При опытном или мелкосерийном производстве, как правило, это делается с помощью резинового ролика (рис. 5), в серийном производстве чаще всего используется шелкография или трафаретная печать. Первый вариант дает приемлемый результат при условии, что сборка выполняется квалифицированным специалистом, имеющим достаточный опыт работы. К недостаткам данного метода можно отнести неоднородность слоя, низкую повторяемость и риск загрязнения. В этом случае обязателен регулярный контроль параметров слоя с помощью специального измерительного инструмента (см. далее).

Таблица 2. Характеристики различных видов ТИМ

Тип, производитель	Описание	Силиконовый носитель	Электропроводность	Способ применения	Толщина слоя, мкм	R_{th}	λ , Вт/м·К
P12, Wacker	Паста, наполнитель Al_2O_3	Да	Нет	Ролик, трафаретная печать	10–100	+	0,81
HTC, Electrotube	Паста, наполнитель Al_2O_3	Нет	Нет		10–100	+	0,9
PSX-P8, Hala Contec	Изм. фазового состояния, наполнитель порошок Al	Нет	Нет		10–100	+	3,4
TIC 1000A, Bergquist	Паста, наполнитель Al_2O_3	Да	Да		15–100	0	1,5
TIC 4000, Bergquist	Паста, наполнитель жидкий металл	Да	Да		100	+	4,0
KU ALC-5, Kunze	Изменение фазового состояния, Al фольга с восковым покрытием	Нет	Да	Вручную	76	0	220
KU ALF, Kunze	Изменение фазового состояния, Al фольга с воском и графитовым покрытием	Нет	Да		76	+	220
Keratherm 86/50, Kerafoil	Пленка, наполнитель нитрид бора	Да	Нет		120	-	2,9
Q2-Pad, Bergquist	Al фольга с графитовым покрытием	Да	Да		152	+	2,5

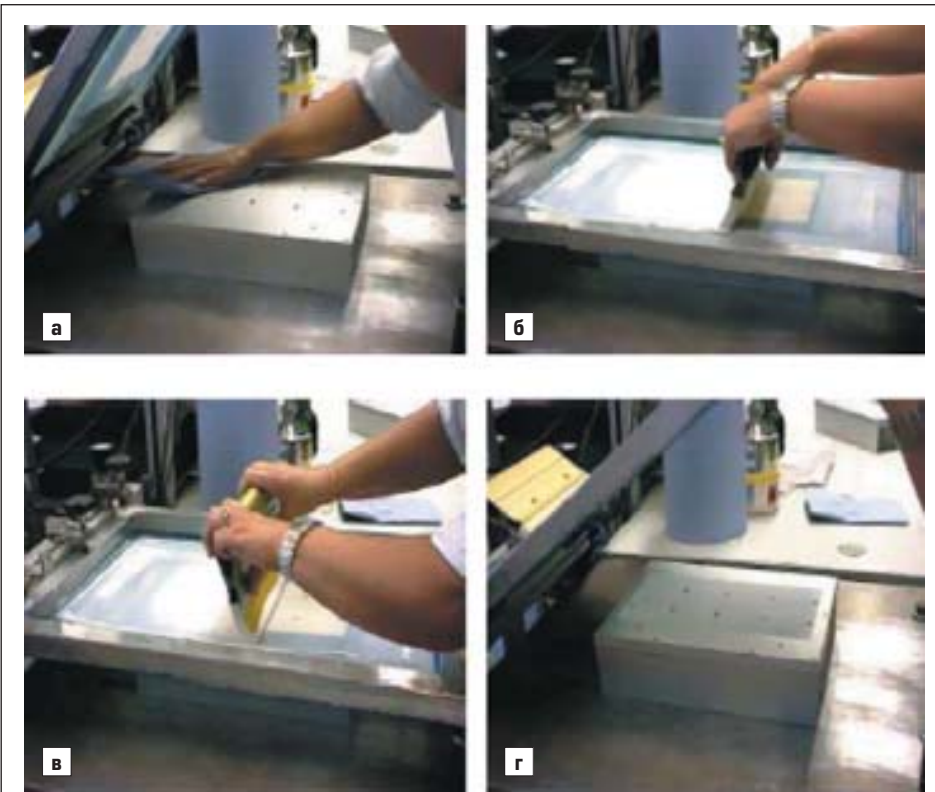


Рис. 6. Нанесение пасты методом трафаретной печати или шелкографии

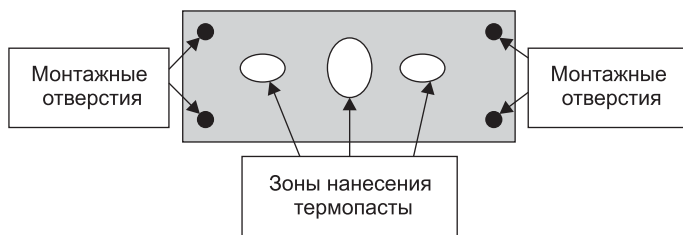


Рис. 7. Основание модуля при неоднородном (зонном) нанесении пасты

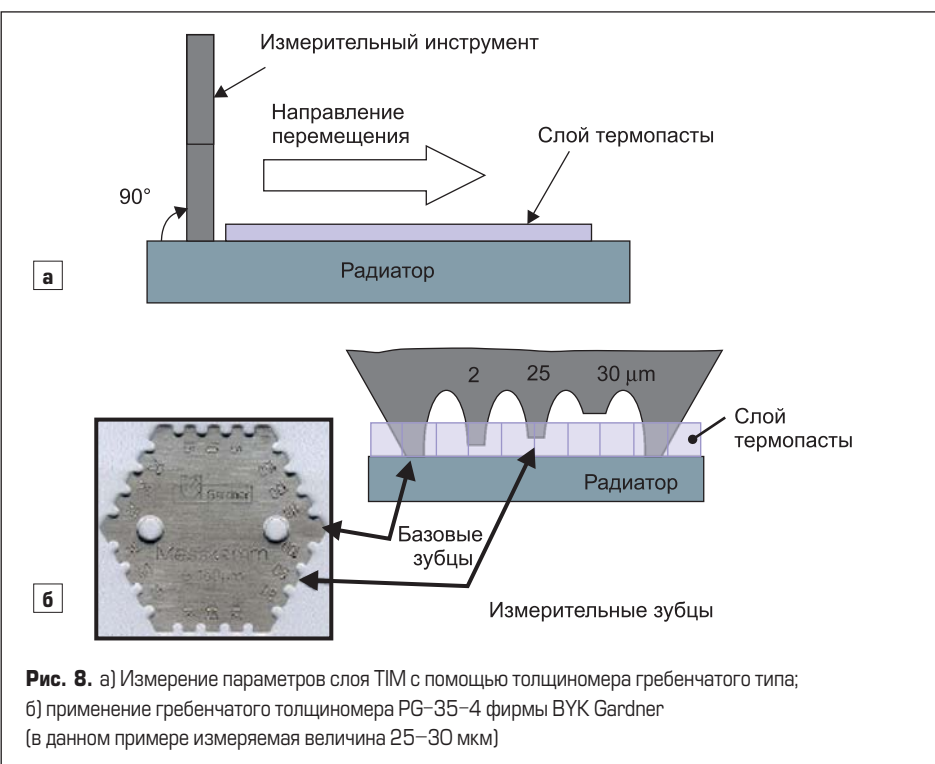


Рис. 8. а) Измерение параметров слоя ТИМ с помощью толщиномера гребенчатого типа; б) применение гребенчатого толщиномера PG-35-4 фирмы ВУК Gardner (в данном примере измеряемая величина 25–30 мкм)

Гораздо лучший эффект дает применение металлических трафаретов из нержавеющей стали с отверстиями круглой или шестигранной формы («сотовая» структура). Результирующие характеристики слоя ТИМ при этом определяются соотношением площадей заполненных и незаполненных зон, а также толщиной трафарета.

Метод шелкографии основан на использовании технического шелка Monolen-PET и полиуретанового ракеля с твердостью 75 по шкале Шора. Итоговая толщина слоя пасты в этом случае зависит от диаметра и количества шелковых нитей на единицу площади.

Трафаретная печать и шелкография обеспечивают высокую точность и повторяемость, особенно при автоматизации этих процессов. Совершенствование технологии автоматической трафаретной печати, сопровождающейся непрерывным мониторингом параметров (так устроена производственная линия SEMIKRON), требует значительных инвестиций, однако в экономическом плане это оправданно, особенно при больших объемах производства.

Последовательность процедур при ручном нанесении термопасты методом трафаретной печати или шелкографии показана на рис. 6: а) Очистка поверхности радиатора моющим раствором для удаления загрязнений и обезжиривания, позиционирование радиатора в технологическом приспособлении. Трафарет (металл или шелк) на этом этапе не должен касаться поверхности теплостока. б) Позиционирование и заполнение трафарета материалом ТИМ (без применения давления). в) Распределение термопасты с помощью ракеля, здесь необходимо приложение некоторого усилия, чтобы гарантировать прилегание трафарета (шелка) к поверхности радиатора. г) Визуальный (оптический) контроль качества.

Кроме соблюдения рекомендаций по толщине слоя, очень важно обеспечить однородное и равномерное распределение материала ТИМ в зазоре между модулем и теплоотводом. Один из достаточно распространенных случаев показан на рис. 7: подобное нанесение пасты «кусками» в надежде на последующее «выдавливание» может привести к растрескиванию керамической подложки при затяжке крепежных болтов. Сказанное относится к модулям любой конструкции, но в большей степени — к «безбазовым», так как мягкое медное основание в какой-то степени сглаживает механическую нагрузку при монтаже. Кроме этого, наличие неоднородностей в слое термопасты может привести к локальному перегреву модуля в местах образования воздушных «карманов».

Контроль качества

Существуют прямые и косвенные способы измерения толщины слоя термопасты. К косвенным методам относится, например, предварительное взвешивание необходимого количества ТИМ с помощью прецизионных весов. Прямое бесконтактное измерение может производиться с помощью оптического профилометра, такого как μSCAN компании Nano Focus. Однако на практике чаще всего используются простые механические тол-

щиномеры гребенчатого или дискового типа (рис. 8, 9). Их недостатком является повреждение слоя в зоне контроля, поэтому измерение производится выборочно для подтверждения качества технологического процесса.

Гребенчатые толщиномеры, производимые компаниями Zehntner (ZND 2051), Elcometer, ВУК Gardner (PG-3504) имеют базовые и измерительные зубцы со шкалой, показывающей расстояние до теплостока. Приспособление устанавливается перпендикулярно поверхности и перемещается вдоль нее в горизонтальном направлении. В результате этого на части зубцов, находящихся ниже поверхности слоя пасты, остаются ее следы. В примере, показанном на рис. 8б, измеряемая величина находится в диапазоне 25–30 мкм. Контроль должен производиться квалифицированным специалистом и только на правильно обработанном радиаторе, т. к. неравномерное перемещение или дефекты поверхности могут привести к погрешности измерения. Ошибочные результаты также могут быть вызваны наличием загрязнений в структуре ТМ.

Применение дискового толщиномера (например, ZWW 2100-2102 компании Zehntner, рис. 9б) дает более точные результаты и в меньшей степени повреждает измеряемый слой. Приспособление состоит из двух опорных дисков, расположенных на краях, и измерительного диска, установленного между ними. Толщиномер прокатывается по слою ТМ, толщина определяется по прерыванию следа термопасты на среднем диске в соответствии со шкалой, нанесенной на опорных дисках (рис. 9в).

Определение оптимальной толщины слоя

Как показано выше, оптимальные характеристики ТМ 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 данные указания относятся к термопасте Wacker P12, при использовании других теплопроводящих материалов рекомендуется проведение следующей процедуры:

1. На модуль (в некоторых случаях на радиатор) 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.
3. Для достижения состояния механической релаксации (т. е. снятия напряжения) установленный модуль должен пройти три термических цикла с градиентом 20–100 °С длительносью 1 ч в соответствии с кривой на рис. 10.
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 с теплостока может привести к повреждению корпуса. Для

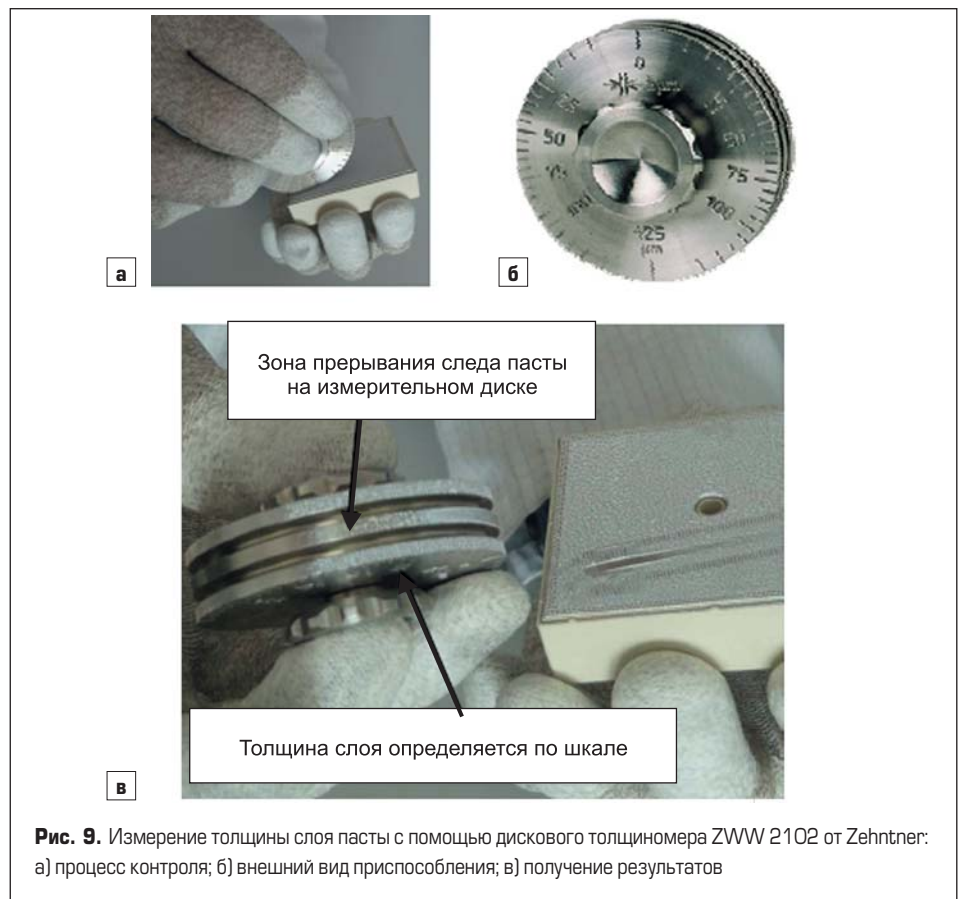


Рис. 9. Измерение толщины слоя пасты с помощью дискового толщиномера ZWW 2102 от Zehntner: а) процесс контроля; б) внешний вид приспособления; в) получение результатов

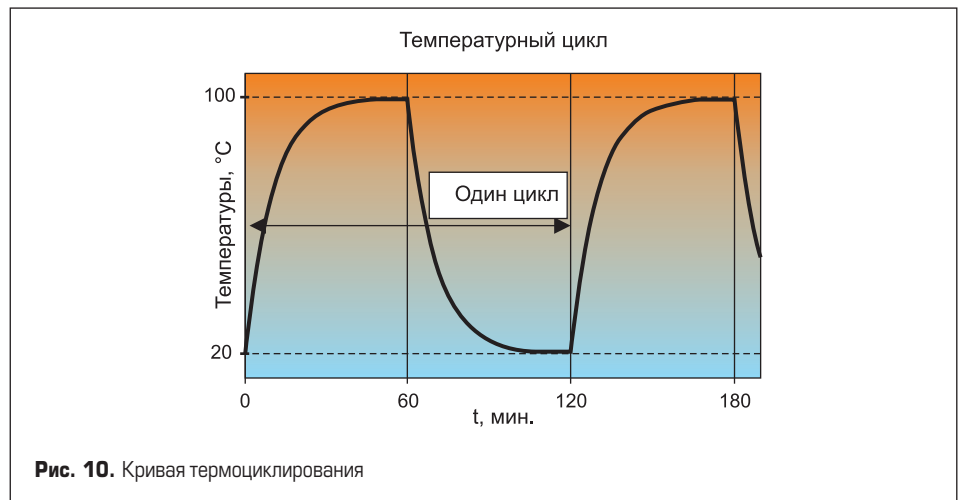


Рис. 10. Кривая термоциклирования

неразрушающего демонтажа после удаления крепежных элементов сборку следует выдержать при комнатной температуре в течение 12 ч или провести один-два цикла «нагрев–охлаждение» (рис. 10). 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 ТМ).

При проведении данной процедуры модуль может использоваться только один раз, поскольку каждая повторная затяжка и ослабление болтов изменяет характеристики прижима. Для всех исследуемых вариантов толщины слоя необходимо провести не менее двух циклов тестирования.

Оптимальным считается вариант, когда теплоотводящее основание модуля после де-

монтажа полностью равномерно покрыто пастой, как показано на рис. 11а. Наличие незаполненных областей на основании говорит о недостаточной толщине слоя (рис. 11б).



Рис. 11. Толщина слоя: а) оптимальная; б) недостаточная

Опция: нанесение пасты в заводских условиях

Процесс применения термопасты является ответственной технологической операцией, от которой во многом зависит надежность работы силового ключа, поэтому многие производители в качестве опции предлагают поставку модулей с предварительно нанесенным теплопроводящим материалом. Основную сложность здесь представляет изготовление упаковки, исключающей повреждение слоя ТИМ, и ужесточение условий транспортирования и хранения.

Поставка модулей с предварительно нанесенной пастой (рис. 12) существенно упрощает процесс монтажа и обеспечивает его высокую повторяемость, это позволяет заказчику исключить сложные и ответственные производственные этапы.

Основные преимущества:

- быстрый и простой процесс монтажа;
- оптимизация толщины слоя, исключение риска растрескивания керамической DBC-подложки;
- улучшение теплоотдачи, снижение теплового сопротивления за счет равномерного распределения слоя;
- упрощение производственной логистики за счет исключения сложных производственных этапов;
- высокая долговременная стабильность тепловых характеристик при использовании лучших материалов (Wacker P12, Electrolube HTC, HALA PCM).

Теплопроводящий материал наносится на модули методом автоматизированной трафаретной печати. Необходимое количество ТИМ указывается в документе Specification Thermal Paste Weight, который выпускается для каждого типоразмера модуля и вида термопасты. Этот документ также содержит рекомендации по толщине слоя (при равномерном распределении). Величина теплового сопротивления в технической документации на модули SEMIKRON относится к термопастам Wacker P12 и Electrolube HTC. Очевидно, что оптимальное значение $R_{th(c-s)}$ обеспечивается при соблюдении требований по качеству обработки радиатора и моментам затяжки крепежных винтов.



Рис. 12. Модуль MiniSKiiP с термопастой P12, нанесенной предприятием-изготовителем

Упомянутый выше документ также определяет производственные допуски и возможные дефекты «сот», не приводящие к ухудшению тепловых характеристик (рис. 13). Максимальное отклонение размеров сотовой структуры составляет 5%, также допускается незначительная подповерхностная миграция материала ТИМ.

Модули с нанесенной пастой проходят дополнительные испытания, подтверждающие надежность при транспортировании и хранении:

- хранение при высокой температуре (300 ч, +125 °C);
- хранение при низкой температуре (300 ч, -40 °C);
- хранение при высокой температуре и влажности (300 ч, +85 °C, 85% RH).

Транспортирование модулей производится при температуре -25...+60 °C и влажности 10-95%, при этих условиях они могут храниться до 18 мес. Чтобы избежать загрязнения, блистерная упаковка должна вскрываться непосредственно перед установкой модуля, при этом должны соблюдаться следующие инструкции:

- Монтажная зона должна быть чистой и свободной от пыли.
- Блистер должен оставаться закрытым во время остановки производства, чтобы избежать загрязнения контактных поверхностей.
- Следует исключить загрязнение термопасты и повреждение сотовой структуры. Попадание частиц размером менее 10 мкм допустимо и не влияет на тепловые характеристики, более крупные частицы следует удалять с помощью пинцета.

На рис. 14 показаны новейшие модули SEMiX серии E4r, соединяемые с драйвером (SKYPER 12) методом прессовой посадки (Press-Fit). В качестве опции SEMIKRON предлагает поставку компонентов с теплопроводящим материалом с изменяемым фазовым состоянием (Phase Change Material, PCM) HALA TPC-Z-PC-P8.

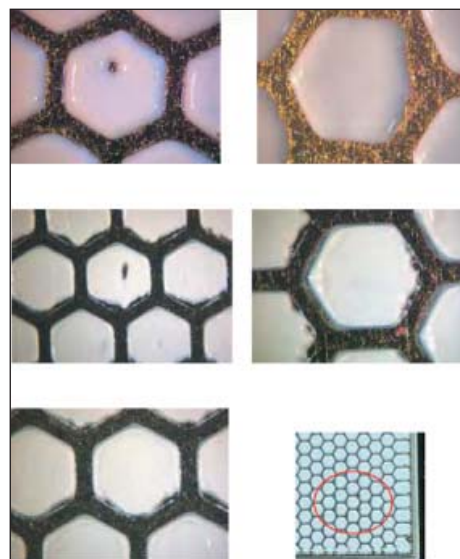


Рис. 13. Допустимые дефекты структуры ТИМ

PCM — основные особенности

Теплопроводящие структуры PCM отличаются высокой теплопроводностью и простотой применения. При комнатной температуре такой материал находится в твердом состоянии, его переход 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).

Материал с изменяемым фазовым состоянием HALA TPC-Z-PC-P8 наносится на базовую плату модуля с помощью металлического трафарета, при этом используется такая же технология, что и для обычной термопасты Wacker P12. Разницу можно почувствовать, прикоснувшись к образовавшемуся слою (рис. 14в): в отличие от P12 PCM по консистенции напоминает свечной воск. В таком виде полупроводниковый модуль монтируется на радиатор, теплопроводящий материал расплавится и равномерно распределится в зазоре при нагревании базовой платы в процессе работы.

От обычных термопаст с силиконовым носителем и металл-оксидным наполнителем PCM отличается более высокой теплопровод-

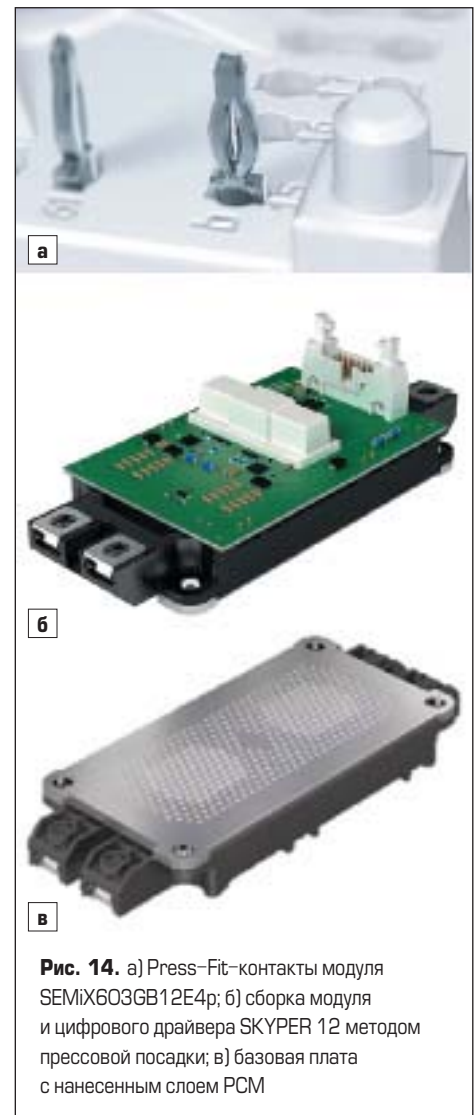


Рис. 14. а) Press-Fit-контакты модуля SEMiX603GB12E4r; б) сборка модуля и цифрового драйвера SKYPER 12 методом прессовой посадки; в) базовая плата с нанесенным слоем PCM

ностью (примерно втрое) и меньшим значением теплового сопротивления ($R_{th(c-s)}$ — до 30%, $R_{th(j-s)}$ — до 15%). При нормальной температуре РСМ представляет собой твердую субстанцию, поэтому риск его загрязнения или повреждения при транспортировке гораздо ниже. Однако в свою очередь это обуславливает более жесткие требования по последовательности и моменту затяжки крепежных винтов при монтаже «безбазовых» модулей, поскольку возрастает риск повреждения керамической DBC-подложки. К недостаткам можно также отнести более высокую стоимость РСМ (примерно в три раза выше, чем у P12). По своим тепловым характеристикам материал HALA TPC-Z-PC-P8 сопоставим с IFX TIM, разработанным и используемым компанией Infineon. Благодаря новой технологии предварительного изгиба базовой платы, реализованной в модулях SEMiX**E4p и позволяющей существенно снизить «биметаллический» эффект, оптимальная толщина рабочего слоя может быть уменьшена до 20–30 мкм, что приводит к заметному улучшению тепловых характеристик.

При нанесении TIM в заводских условиях используются 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. Подобные системы способны контролировать качество сотовой структуры TIM на основании модуля даже

при поступательном и вращательном изменении его положения. Для их работы используется принцип высокоскоростного 3D-распознавания образов, позволяющий фиксировать мельчайшие отклонения размеров или наличие перемычек между сотами.

Заключение

С начала 90-х годов компания SEMIKRON использует и совершенствует метод трафаретной печати для нанесения теплопроводящей пасты, этот процесс полностью автоматизирован при производстве интеллектуальных модулей SKiiP. Технология адаптирована для массового производства, при этом допустимая погрешность толщины слоя составляет ± 10 мкм. Статистика показывает, что при нанесении пасты через «сотовый» трафарет только у 60 из 1 миллиона ячеек размеры выходят за рамки нормированных значений.

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 увеличению теплового сопротивления, перегреву и в конечном итоге — отказу или сокращению срока службы изделия.

Развитие IGBT-технологий, а также появление новых широкозонных материалов предъявляют все более жесткие требования к качеству теплопроводящих материалов. Их вклад в общее значение R_{th} при жидкостном охлаждении достигает 30%, в результате чего TIM становится одним из ограничивающих факторов на пути дальнейшего повышения плот-

ности мощности. Компания SEMIKRON занимается поиском альтернативных решений, позволяющих полностью отказаться от применения термопаст. Революционным шагом на этом пути стала разработка SKiN-модулей [7], все тепловые связи в которых обеспечиваются за счет спекания серебряного порошка.

Однако теплопроводящие материалы еще долго будут необходимы при монтаже стандартных модулей, и оптимальным решением здесь может стать использование паст с изменяемым фазовым состоянием. Для их нанесения в условиях предприятия-изготовителя используется хорошо отработанный процесс трафаретной печати.

Литература

1. Dieter Esau. THERMAL PASTE APPLICATION. SEMIKRON AN10-001.
2. Pre-applied thermal paste on MiniSKiiP. Technical Information. SEMIKRON. 2006.
3. А. Колпаков. Надежность прижимных соединений в условиях агрессивных сред // Силовая электроника. 2006. № 4.
4. Freyberg, M. Application of thermal paste for power modules without base plate. SEMIKRON International. 1999.
5. Goldman, W. E. An Introduction to the Art of Heat Sinking // Electronic Packaging and Production 1966.
6. Strube M (2007) Thermal Paste Spread and Ready for Use. Bodo's Power System. May, 2007
7. А. Колпаков. SKiN-технология — силовая электроника завтрашнего дня // Силовая электроника. 2013. № 1.