

## Компаунд, паста или пленка?

Особенностям применения теплопроводящих материалов посвящено много статей и руководств по эксплуатации, однако проблема улучшения отвода тепла от силовых модулей продолжает вызывать интерес специалистов. От соблюдения требований, связанных с качеством обработки поверхности радиатора и нанесения пасты, во многом зависит эффективность работы преобразовательных устройств.

Промышленность выпускает широкую номенклатуру компаундов и пленок, предназначенных для улучшения теплопередачи и снижения теплового сопротивления. Для изучения и сравнения свойств различных типов теплопроводящих материалов проводятся специальные исследования, результаты которых приведены в предлагаемой статье.

Андрей КОЛПАКОВ

Andrey.Kolpakov@semikron.com

### Основные положения

Тепловое сопротивление «кристалл — окружающая среда»  $R_{thJA}$  силового модуля является суммой нескольких составляющих, обусловленных наличием тепловых переходов «кристалл—корпус» ( $R_{thJC}$ ), «корпус—радиатор» ( $R_{thCS}$ ,  $R_{thCH}$ ) и «радиатор — окружающая среда» ( $R_{thSA}$ ). Обеспечение минимального перегрева кристалла относительно корпуса и снижение значения  $R_{thJC}$  является задачей производителей электронных компонентов, это достигается с помощью применения новых технологий, материалов и совершенствования процесса производства.

В настоящей статье рассматривается параметр, определяющий разность температур корпуса и теплоотвода — тепловое сопротивление  $R_{thCS}$  ( $R_{thCH}$ ), величина которого непосредственно зависит от свойств материалов, используемых для улучшения условий охлаждения.

Из-за неоднородности сопрягаемых поверхностей радиатора и силового модуля между ними неизбежно присутствуют воздушные зазоры, препятствующие нормальному отводу тепла (рис. 1а). Если не принять мер для улучшения теплопередачи, модуль будет перегреваться.

Для обеспечения отвода тепла весь воздух из зазоров (напомним, что теплопроводность

воздуха  $\lambda_{air} \approx 0,03$  Вт/(м·К)), должен быть вытеснен эластичным составом, имеющим более высокую теплопроводность. Однако теплопроводность самых лучших компаундов (среднее значение  $\lambda_{paste} \approx 1,0$  Вт/(м·К)) гораздо хуже, чем у металлов (например, для меди  $\lambda_{copper} \approx 400$  Вт/(м·К)), поэтому качество сопрягаемых поверхностей и толщина зазора в любом случае имеют определяющее значение.

Для улучшения качества теплопередачи необходимо обеспечить максимальную площадь соприкосновения основания модуля и радиатора. На рис. 2 показана нормированная кривая зависимости теплового сопротивления от толщины слоя компаунда. Пока она меньше величины зазора (красная зона ниже оптимального значения), значение  $R_{th}$  велико из-за оставшихся под основанием модуля пустот. После достижения оптимума тепловое сопротивление вновь начинает расти, поскольку, как было указано выше, теплопроводность пасты заметно хуже, чем у сопрягающихся материалов радиатора и силового модуля.

Недостаточная толщина слоя теплопроводящего материала может привести к увеличению тепловых перегрузок и сокращению срока службы силового ключа. Избыток пасты не только способствует увеличению теплового сопротивления, но и может вызвать повреждение керамической подложки при затяжке крепежного винта. Особенно это относится к «безбазовым» модулям, у которых основанием является изолирующая DBC-плата. На рис. 26 приведено увеличенное изображение области подложки модуля MiniSKiiP, поврежденной в результате затяжки крепежного винта при превышении толщины слоя теплопроводящей пасты (трещины показаны красными стрелками).

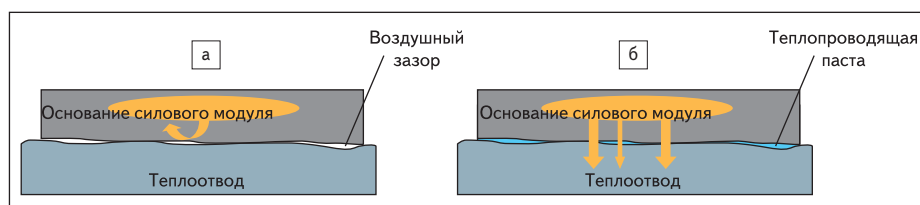


Рис. 1. Зазор в сопряжении силового модуля и радиатора

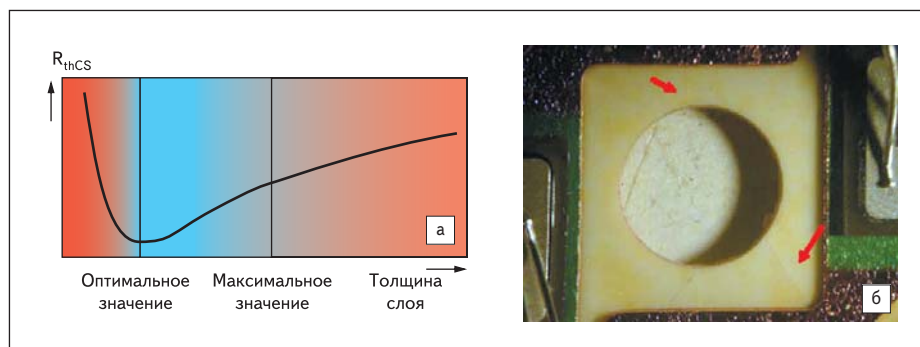


Рис. 2. Зависимость теплового сопротивления от толщины слоя теплопроводящего материала

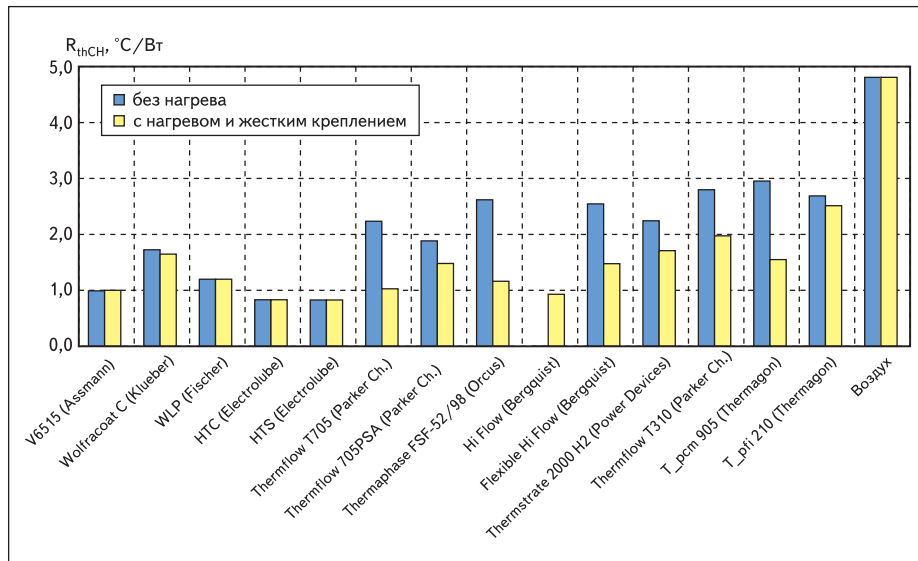


Рис. 3. Результаты измерений теплового сопротивления для различных типов компаундов и пленок (тестовый модуль IGBT — BSM100GD120DLC)

### Сравнительные характеристики

Механические характеристики теплопроводящих материалов должны обеспечивать их равномерное распределение в зазоре между модулем и радиатором. Кроме того, очень важным свойством паст является долговременная стабильность параметров.

На рис. 3 показаны результаты измерения теплового сопротивления  $R_{thCH}$  «корпус–теплоотвод» для различных материалов. Необходимо отметить, что полученные экспериментально значения могут несколько отличаться от справочных величин, что объясняется разницей методик измерения.

Достоинства и недостатки широко распространенных паст, таких как V6515 (Assmann), WLP (Fischer) и HTC/HTS (Electrolube), хорошо известны: для них достаточно тяжело подобрать оптимальную толщину слоя и обеспечить повторяемость результатов при серийном производстве. Однако эта проблема практически снимается при нанесении методом трафаретной печати. Данные пасты отличаются хорошей эластичностью и не подвержены фазовым переходам. Таким образом, при использовании таких материалов модуль может быть установлен на радиатор за одну технологическую операцию без применения повторной затяжки крепежных соединений. Кроме того, при демонтаже компонентов очистка поверхностей не представляет никаких сложностей.

В ходе испытаний самые лучшие результаты были получены при использовании паст HTC/HTS (Electrolube) и Wolfracoat C (Klüber), которые по структуре более всего напоминают консистентные смазки. Они обеспечивают минимальное тепловое сопротивление, простоту применения и высокую временную стабильность характеристик.

Остальные материалы можно отнести к пленкам: это Thermflow T705 (Parker Chomerics) и Thermaphase FSF-52/98 (Orcus), двухсторонние ленты на алюминиевом носителе; Thermstrate 2000 H2 (Power Devices Inc.) и Flexible Hi Flow (Bergquist), а также теплопроводящие пасты на носителе из стекловолокна: Thermflow T310 (Parker Chomerics) и T\_pli 210/T\_pcm 905 (Thermagon).

В общем случае применение пленок создает меньше проблем, они обеспечивают лучшую повторяемость характеристик и упрощение технологического процесса благодаря фиксированной толщине. Однако при внимательном анализе выясняется, что работа с пленками имеет свои особенности. Их хрупкость и ломкость может создавать трудности при отделении от защитного носителя и нанесении на модули с большой площадью основания. После демонтажа такие материалы оставляют на радиаторе следы с высокой степенью адгезии, в результате чего при замене модулей требуется тщательная очистка поверхности.

Внимания требуют и характеристики фазового перехода: после установки и первичного крепления модуля радиатор должен

быть нагрет до температуры перехода. После этого необходима повторная затяжка крепежных винтов в соответствии с инструкциями по монтажу.

Ниже описаны некоторые специфические свойства тестируемых материалов:

- **Thermflow T705 (Parker Chomerics)**. Затруднено отделение материала от защитной пленки вследствие его хрупкости и ломкости. Версия Thermflow T705PSA имеет дополнительный клеевый слой, что упрощает его нанесение на поверхность модуля, однако исследования показали, что это приводит к увеличению теплового сопротивления. Следует отметить, что этот эффект не отражен в технической документации.
- **Thermaphase FSF-52/98 (Orcus)**. Гибкий и однородный материал, легко наносится и обладает хорошей адгезией. Особенности фазовой характеристики, имеющей переход при температуре 52 или 98 °C, требуют повторной затяжки крепежа после установки. Для улучшения свойств данной пасты рекомендуется применение специальных растворителей.
- **Hi Flow (Bergquist)**. Компаунд предназначен для нанесения на основание модуля с помощью трафаретной печати, допустимо применение трафаретов с широким диапазоном размеров ячеек и расстояний между ними. При испытаниях потребовалась повторная затяжка крепежа после изменения фазового состояния пасты.
- **Flexible Hi Flow (Bergquist)**. Особенностью этого компаунда является высокая адгезия к алюминию, поэтому требуется тщательная очистка радиатора после демонтажа.
- **T\_pli 210/T\_pcm 905 (Thermagon)**. Материал предназначен в первую очередь для заполнения больших зазоров, для тестов была использована самая тонкая пленка в данной серии. Однако даже в этом случае ее практическая пригодность оказалась очень низкой — из-за высокой толщины слоя невозможно обеспечить эффективный отвод тепла.
- **T\_pcm 905** по структуре напоминает воск и имеет защитное пластиковое покрытие. Обращаться с пленкой достаточно удобно, однако при демонтаже она оставляет труд-

Таблица 1. Основные свойства теплопроводящих материалов

| Параметр                   | Теплопроводящий компаунд                       | Теплопроводящая пленка  | Теплопроводящая паста (нанесение методом шелкографии) |
|----------------------------|--|---|---|
| Повторяемость толщины слоя | — требуется тщательная подготовка производства | + очень хорошая   | + очень хорошая                                       |
| Использование              | ± вручную с помощью ролика или ракеля          | ± требуется резка пленки  | Производится на специальном приспособлении            |
| Повторная затяжка крепежа  | + не требуется                                 | — требуется при высокой толщине пленки                                      | Исключается при правильном подборе толщины слоя       |
| Риски                      | Загрязнение рабочего места вредными веществами | Повреждение пленки при неаккуратном обращении                               | Повреждение трафарета при неаккуратном обращении      |
| Очистка при демонтаже      | + простая                                      | — удаление остатков с высокой адгезией                                      | — удаление остатков с высокой адгезией                |
| Стоимость                  | + низкая                                       | — высокая (с учетом отрезной машины)  | — высокая (с учетом машины для шелкографии)           |
| Тепловое сопротивление     | + низкое                                       | — высокое при наличии пластикового носителя, + низкое для отделяемых пленок | + низкое  |

Таблица 2. Типы и производители теплопроводящих материалов

| Тип материала           | Производитель      | Сайт   | Характеристика   |
|-------------------------|--------------------|--|--|
| V6515                   | Assmann            | <a href="http://www.assmann.com">www.assmann.com</a>                         | Паста  |
| Wolfracoat              | Kluber             | <a href="http://www.kluber.com">www.kluber.com</a>                           | Графитосодержащая паста                                |
| WLP                     | Fischer            | <a href="http://www.fischeerelektronik.de">www.fischeerelektronik.de</a>     | Паста на основе кремния                                |
| HTC                     | Electrolube        | <a href="http://www.electrotube.com">www.electrotube.com</a>                 | Паста  |
| HTS                     | Electrolube        | <a href="http://www.electrotube.com">www.electrotube.com</a>                 | Силиконосодержащая паста                               |
| Thermofrow T705/T705PSA | Parker Chomerics   | <a href="http://www.chmerics.com">www.chmerics.com</a>                       | Гомогенный теплопроводящий материал/самоклеящийся      |
| Thermaphase FSF-52/98   | Orcus              | <a href="http://www.electronics-cooling.com">www.electronics-cooling.com</a> | Гомогенный теплопроводящий материал                    |
| Hi Flow                 | Bergquist          | <a href="http://www.bergquistcompany.com">www.bergquistcompany.com</a>       | Гомогенный теплопроводящий материал                    |
| Flexible Hi Flow        | Bergquist          | <a href="http://www.bergquistcompany.com">www.bergquistcompany.com</a>       | Пленка на алюминиевом носителе с 2-сторонним покрытием |
| Thermstrate 2000 H2     | Power Devices Inc. | <a href="http://www.powerdevices.com">www.powerdevices.com</a>               | Пленка на алюминиевом носителе с 2-сторонним покрытием |
| Thermflow 310           | Parker Chomerics   | <a href="http://www.chmerics.com">www.chmerics.com</a>                       | Теплопроводящий материал на текстильном носителе       |
| T_pcm 905/T_pli 210     | Thermagon          | <a href="http://www.thrmagon.com">www.thrmagon.com</a>                       | Теплопроводящий материал на текстильном носителе       |

Таблица 3. Характеристики теплопроводящих материалов

| Тип материала           | $R_{\text{гис}}$ , °C/Вт | Толщина слоя, мкм | Теплопроводность, Вт/(К·м) | Изменение фазового состояния, С | Рабочая температура, °C |
|-------------------------|--------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| V6515                   | 1,0                      | 50                | 1,0                        | —                               | ...200                  |
| Wolfracoat              | 1,65                     | 50                | —                          | —                               | -30...200               |
| WLP                     | 1,20                     | 50                | 0,61                       | —                               | 0...250                 |
| HTC                     | 0,84                     | 50                | 0,9                        | —                               | -50...130               |
| HTS                     | 0,83                     | 50                | 0,9                        | —                               | -50...200               |
| Thermofrow T705/T705PSA | 1,03/1,48                | 140               | 0,7                        | 45                              |                         |
| Thermaphase FSF-52/98   | 1,18                     | 125...150         | —                          | 52/98                           |                         |
| Hi Flow                 | 0,94                     | 50                | 1,6                        | 55                              |                         |
| Flexible Hi Flow        | 1,49                     | 50+40+50          | 0,9                        | 65                              |                         |
| Thermstrate 2000 H2     | 1,72                     | 50+50+50          | —                          | 60                              |                         |
| Thermflow 310           | 1,99                     | 180               | 0,6                        | 46                              | -40...+125              |
| T_pcm 905/T_pli 210     | 1,56/2,53                | 125/250           | 2/6                        | 50                              | -40...+200              |

но смываемые следы на радиаторе и модуле. Кроме того, пластиковый носитель существенно ограничивает гибкость пленки.

Основные свойства различных типов теплопроводящих материалов приведены в таблице 1.

Если не принимать во внимание технологические особенности, наилучшими тепловыми характеристиками обладают материалы с наиболее равномерной структурой. Гомогенные пасты и пленки имеют очевидное преимущество, особенно в том случае, если они используются без носителя и их применение обеспечивает однородный и тонкий теплопроводящий слой. Неотделимый носитель (на основе алюминия или стекловолокна) образует дополнительный тепловой переход, что неизбежно ведет к увеличению теплового сопротивления и большему перегреву силового модуля. В таблицах 2, 3 указаны типы и основные характеристики протестированных теплопроводящих материалов.

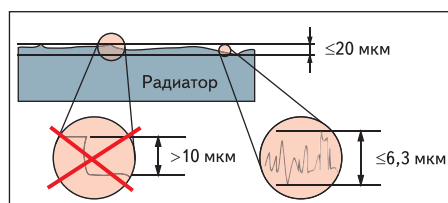


Рис. 4. Требования к качеству поверхности радиатора модуля MiniSKiiP

### Применение теплопроводящих материалов

Для обеспечения хороших тепловых характеристик поверхность радиаторов должна удовлетворять соответствующим требованиям по шероховатости, высоте перепадов

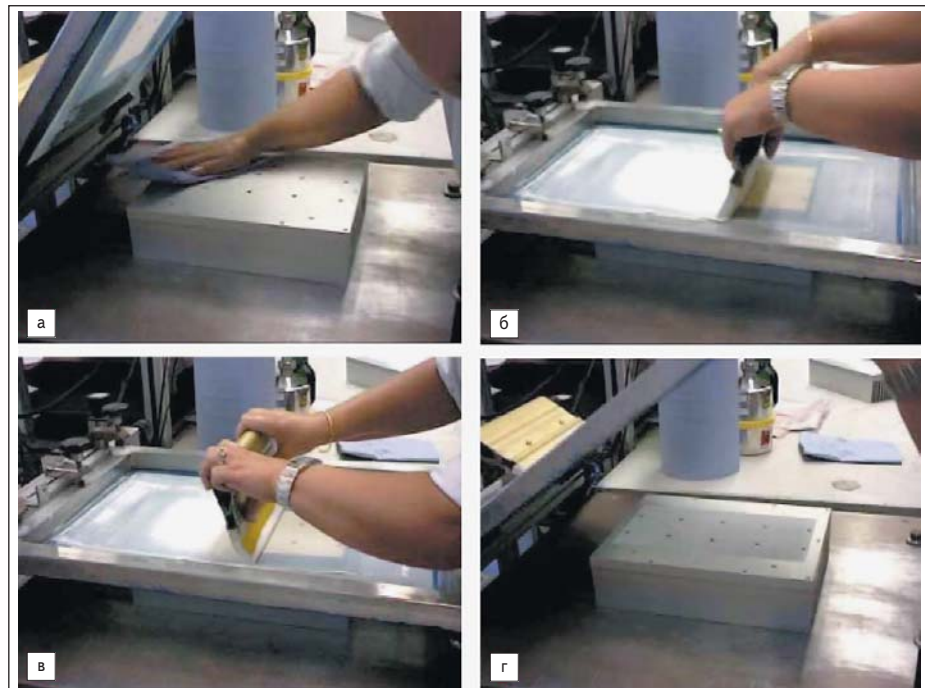


Рис. 5. Нанесение теплопроводящей пасты методом трафаретной печати

Таблица 4. Результаты измерений толщины слоя теплопроводящей пасты

| Характеристика трафарета Monolen-PET  | 77–55 | 43–80 | 27–140 |
|---------------------------------------|-------|-------|--------|
| Количество нитей на 1 см <sup>2</sup> | 77    | 43    | 27     |
| Диаметр нити, мкм                     | 55    | 80    | 140    |
| Результирующая толщина слоя, мкм      | 20–30 | 40–50 | 70–80  |

и суммарной неравномерности, которые оговариваются в технической документации. Пример таких требований, предъявляемых к качеству обработки тепловода при установке миниатюрных «безбазовых» модулей IGBT MiniSKiiP, показан на рис. 4.

Не менее важно обеспечить нанесение максимально равномерного и однородного слоя теплопроводящей пасты, особенно при установке модулей, не имеющих базовой платы. Неоднородность может привести к возникновению локальных перегревов, что негативно влияет как на режимы работы силовых кристаллов, так и на материал керамики, находящейся в основании модулей подобной конструкции.

При опытном производстве или ремонте теплопроводящий компаунд можно наносить жестким обрезиненным валиком. Для обеспечения высокого качества нанесения пасты и хорошей повторяемости технологического процесса используется трафаретная печать. Данный способ является оптимальным при серийном изготовлении, и именно он применяется компанией SEMIKRON. В таблице 4 показаны результаты измерений толщины слоя пасты Silicon Paste P12, полученные при использовании трафаретов типа Monolen-PET и полиуретанового ракеля твердостью 75 единиц по методу Шора.

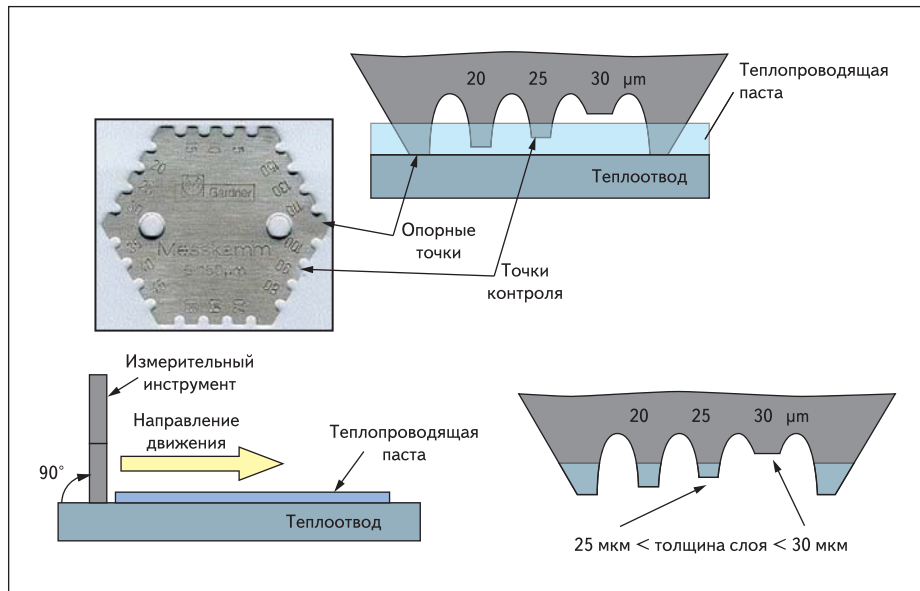


Рис. 6. Контроль толщины слоя с помощью измерителя ZND 2050–2054

Процедура нанесения пасты на поверхность радиатора (или основание силового модуля) состоит из следующих этапов:

- позиционирование радиатора в приспособлении;
- очистка поверхности изопропиловым спиртом (рис. 5а);
- заполнение трафарета теплопроводящей пастой, при этом трафарет не должен касаться поверхности теплоотвода — расстояние между ними должно быть 5–15 мм (рис. 5б);
- нанесение оттиска на радиатор с помощью полиуретанового ракеля (рис. 5в);
- окончание процесса, визуальный контроль (рис. 5г).

Процесс контроля толщины слоя и специальный инструмент для его измерения ZND 2050–2054 показаны на рис. 6. Измерительная «гребенка» имеет базовые поверхности по краям и измерительные «зубцы», отстоящие от базы на соответствующее расстояние. При движении приспособления по поверхности радиатора (перпендикулярно ей)

следы пасты остаются на зубцах, расположенных ниже поверхности нанесенного слоя.

Как показывает график периодической проверки технологической операции (рис. 7), спустя некоторое время параметры слоя пасты перестают удовлетворять заданным требованиям. В этом случае трафарет должен быть очищен или заменен.

Для контроля качества заполнения зазора используется метод, основанный на измерении площади соприкосновения нанесенной на радиатор пасты и «сухой» поверхности основания модуля. Для этого на специально подготовленный теплоотвод устанавливается модуль, затяжка крепежных болтов производится с определенным в спецификации моментом. После выдержки в течение нескольких часов модуль снимается с радиатора. Если его теплоотводящее основание полностью покрыто пастой (рис. 7б), качество нанесения пасты считается удовлетворительным. Наличие незаполненных участков на поверхности модуля (рис. 7в) говорит о недостаточной толщине слоя.

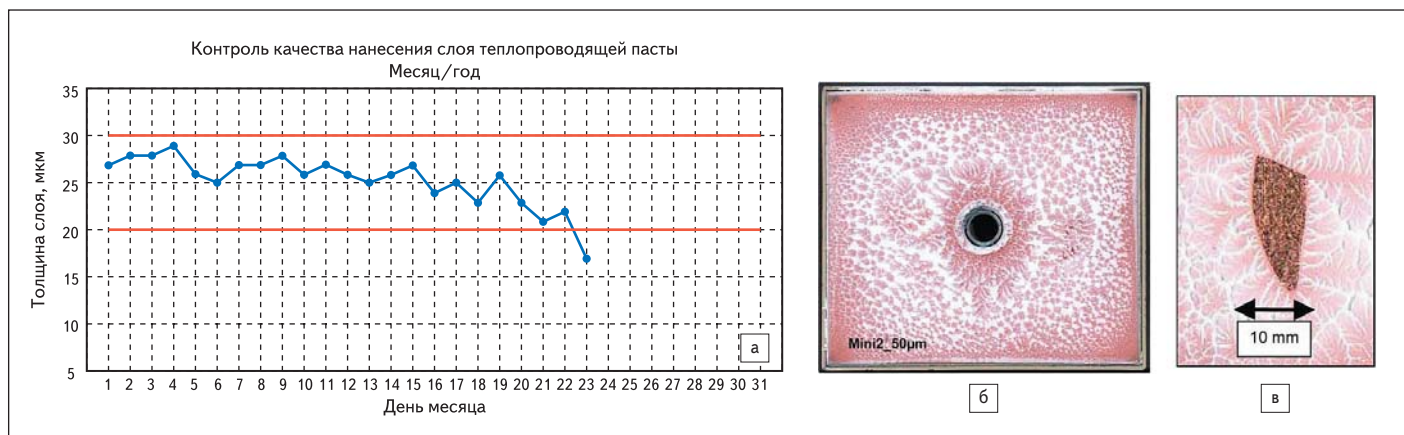


Рис. 7. Контроль: а) трафарета; б, в) качества заполнения зазора

### Модули с нанесением теплопроводящей пасты: новая опция SEMIKRON

Во всех своих разработках, включая производство заказных силовых сборок, SEMIKRON использует теплопроводящие пасты ведущих европейских производителей: Wacker P12 (на силиконовой основе) и Electrolube HTC. Компания предлагает своим клиентам новую услугу: поставку модулей с предварительно нанесенным слоем теплопроводящей пасты. Это позволяет упростить процесс монтажа за счет исключения важного и ответственного технологического этапа и обеспечить высокую повторяемость производственного процесса.

Новая опция обеспечивает следующие преимущества:

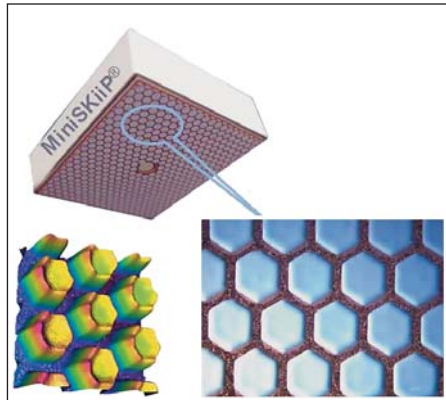
- быстрая и простая операция установки модулей на теплоотвод, возможность автоматизации производства;
- оптимальная толщина слоя пасты, снижение риска повреждения керамического основания модуля;
- хорошее распределение пасты в зазоре, равномерный отвод тепла, минимальное тепловое сопротивление;
- высокая временная стабильность тепловых характеристик.

Обработанные таким образом модули подвергаются ряду специальных тестов, позволяющих оценить стабильность покрытия при транспортировании и хранении. Виды и условия проведения испытаний приведены в таблице 5.

При нанесении теплопроводящей пасты методом трафаретной печати возможны незначительные колебания толщины наносимого слоя и мелкие дефекты покрытия. Девиация толщины и размеры лагун не превышают 5%, такие отклонения не влияют на качество слоя, образующегося между основанием модуля и теплоотводом при монтаже. Равномерное распределение пасты при затяжке крепежных винтов обеспечивается благодаря сотовой структуре покрытия, показанной на рис. 8.

**Таблица 5.** Квалификационные испытания для проверки качества нанесения теплопроводящей пасты

| Вид испытаний на надежность                  | Условия испытаний      |
|--|------------------------|
| Хранение при высокой температуре             | 300 ч / 125 °С         |
| Хранение при низкой температуре              | 300 ч / -40 °С         |
| Хранение при высокой температуре и влажности | 300 ч / 85 °С / 86% RH |



**Рис. 8.** Модуль MiniSKiiP с предварительно нанесенной теплопроводящей пастой

Транспортировка модулей с предварительно нанесенной пастой допускается при температуре  $-25...+60$  °С и влажности, не превышающей 96% RH, в данных условиях они могут храниться до 18 месяцев. При поставке компонентов в соответствии с указанной опцией на упаковке делается специальная маркировка, состоящая из 4 элементов, например **TP P12 Mini1 II.Gen**. Первый элемент обозначения говорит о наличии на поверхности теплопроводящей пасты (TP = Thermal Paste application), второй указывает на тип пасты (P12 от Wacker), далее следует обозначение типа корпуса (Mini1) и номера поколения (II Generation).

### Заключение

Более 10 лет компания SEMIKRON использует трафаретную печать при нанесении теплопроводящей пасты. Данный технологический процесс адаптирован для массового производства, при этом технологические допуски укладываются в нормы «6 сигм» (Six Sigma). Допустимая погрешность толщины слоя составляет  $\pm 10$  мкм, статистика показывает, что только у 60 из 1 миллиона ячеек размеры выходят за рамки нормированных значений.

Использование технического шелка с тарированными размерами ячеек позволяет обеспечивать высокую точность и равномерность толщины слоя, для каждого типа модулей применяется трафарет с соответствующими параметрами. Естественно, что для получения требуемого значения теплового сопротивления  $R_{thCS}$  необходимо также, чтобы качество обработки поверхности радиатора и момент затяжки крепежа соответствовали требованиям спецификаций. Нарушение этих требований неизбежно приведет к увеличению теплового сопротивления, перегреву и в конечном итоге — отказу или сокращению срока службы изделия. ■

### Литература

1. Freyberg M. Application of thermal paste for power modules without base plate. SEMIKRON International, 1999.
2. Колпаков А. И. Правда и миф о теплопроводящей пасте // Производство электроники. 2005. № 1.
3. Comparison of thermal compounds and heat conducting foils. EUPEC Application Notes.
4. Goldman W. E. An Introduction to the Art of Heat Sinking. Electronic Packaging and Production, 1966.