

Исследование теплопроводящих материалов

Разработчики современной преобразовательной техники стремятся к повышению удельной мощности преобразователей. Поэтому одним из важных этапов данной работы становится решение задачи по повышению эффективности отведения тепла от силовых полупроводниковых ключей, таких как IGBT-модули. Однако недостаточно просто выбрать охладитель и силовой IGBT-ключ с минимальными тепловыми сопротивлениями, не меньшее значение имеет и выбор и правильное применение теплопроводящего материала (ТИМ), обеспечивающего необходимый тепловой контакт модуля и охладителя. Компания «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» провела собственное исследование теплопроводящих материалов, результаты которого представлены в данной статье.

Александр Болдырев

a.boldyrev@proton-electrotex.com

Игорь Ветров

i.vetrov@proton-electrotex.com

Введение

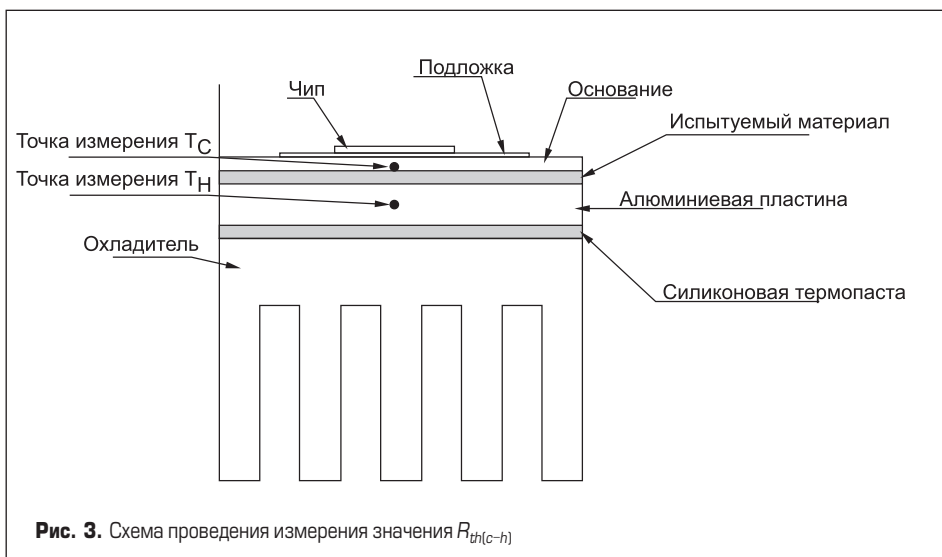
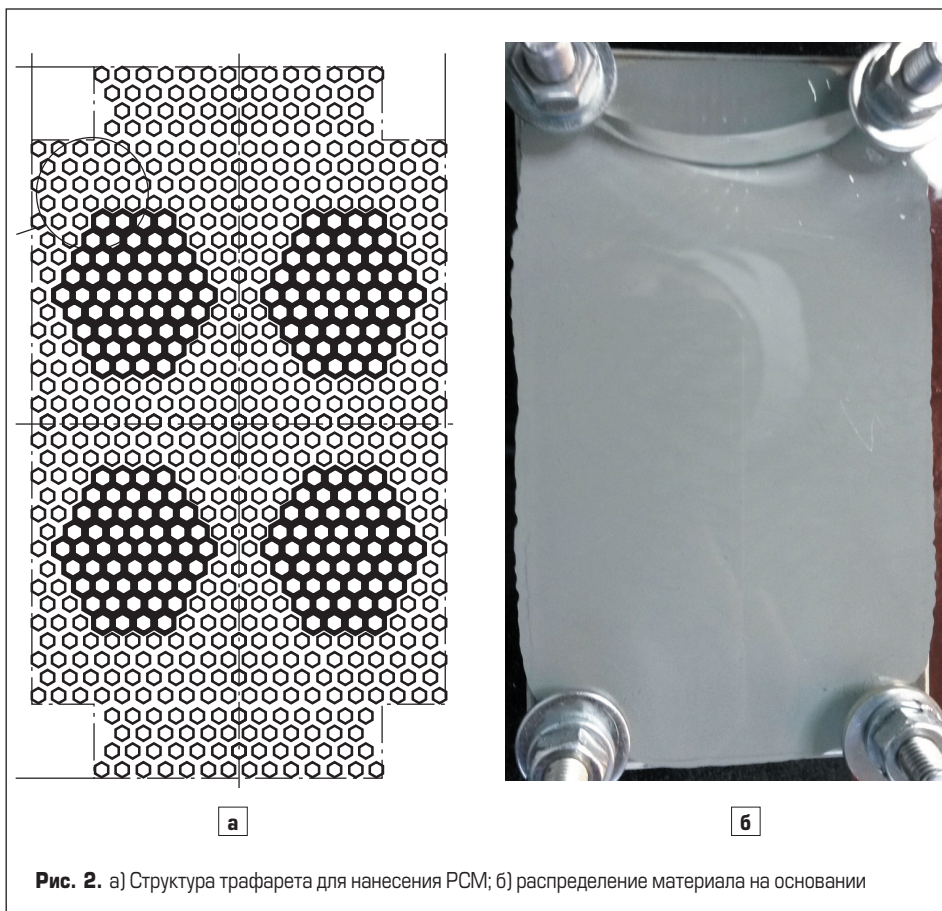
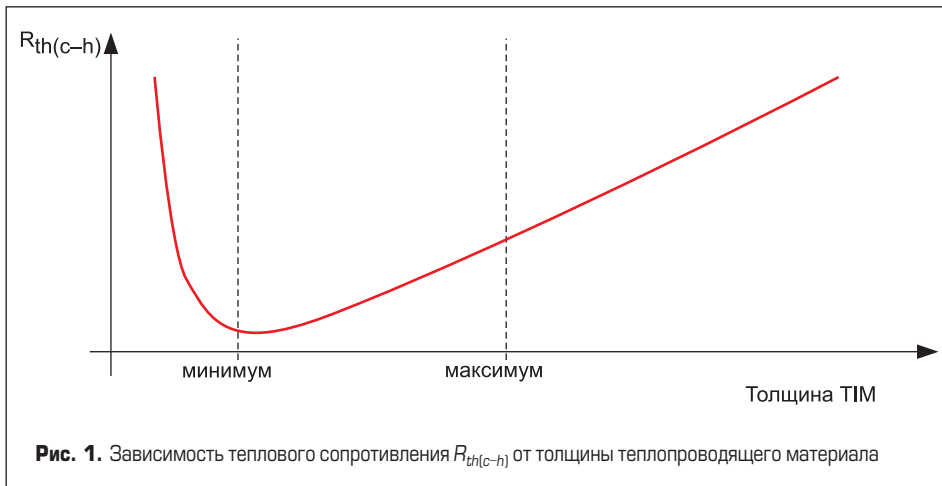
Во время работы IGBT-модули выделяют большое количество тепла, для отведения которого применяются различные охладители. Количество тепла, которое способна отвести от себя система «модуль — охладитель», определяется ее общим тепловым сопротивлением. Значительный вклад в это сопротивление вносит материал термоинтерфейса, нанесенного между основанием модуля и охладителем. У любого материала, служащего в качестве термоинтерфейса, собственное тепловое сопротивление R_{th} выше, чем у алюминия или меди, из которых изготавливаются охладитель и основание модуля. Отказаться от использования ТИМ нельзя, потому что он компенсирует неровности, каверны и пустоты, вызванные неидеальностью совмещаемых поверхностей. Воздух, заполняющий эти неровности, препятствует нормальной теплопередаче, поскольку обладает низкой теплопроводностью. Для обеспечения качественного теплового контакта применяют несколько видов теплопроводящих материалов, получивших наибольшее распространение в силовой электронике, таких как термопасты, различные типы термопрокладок, и материалы с изменяющимся фазовым состоянием.

Традиционно разработчики преобразовательной техники используют силиконовые теплопроводящие пасты. При низкой стоимости эти материалы обладают достаточно высокой теплопроводностью. Однако теплопроводящие пасты имеют ряд недостатков, например способны выдавливаться из-под основания модуля из-за капиллярного и ринг-эффектов во время термоциклирования. С течением времени многие термопасты пересыхают, а это влечет за собой рост теплового сопротивления и может в дальнейшем привести к отказу оборудования. Также во избежание нежелательных загрязнений, возникающих при нанесении силиконовой термопасты, необходима соответствующая организация технологического процесса, которая требует дополнительных инвестиций.

Со временем на смену термопастам пришли теплопроводящие прокладки. Термопрокладки, выполненные на основе силикона, имеют более долгий срок службы до момента пересыхания, не подвержены капиллярному и ринг-эффектам и более удобны в использовании, чем термопасты. При этом термопрокладки имеют достаточно высокую стоимость относительно силиконовых теплопроводящих паст. Современные технологии позволили создать теплопроводящие прокладки на основе графита. Такие термопрокладки превосходят по тепловым характеристикам силиконовые и практически не подвержены эффектам старения, что значительно увеличивает их срок службы. Однако графитовые теплопроводящие прокладки сейчас имеют еще более высокую стоимость, нежели классические силиконовые прокладки.

Сегодня в силовой электронике все большее применение находят материалы с изменяющимся фазовым состоянием (англ. Phase-Change Material — PCM). Основное свойство PCM — способность менять свое агрегатное состояние при достижении температуры фазового перехода. Иными словами, при достижении определенного температурного порога материал переходит из твердого состояния в жидкое. Данный процесс является обратимым, и после снижения температуры ниже значения температуры фазового перехода PCM вновь затвердевает.

PCM в качестве термоинтерфейса сочетает преимущества классических термопаст и теплопроводящих прокладок, однако при соблюдении температурных режимов не подвержен пересыханию, капиллярному эффекту и эффектам деградации материала, характерным для термопаст, а также имеет гораздо более низкую стоимость по сравнению с термопрокладками. Твердое агрегатное состояние PCM-материалов при нормальных условиях позволяет поставлять IGBT-модули с уже преднанесенным термоинтерфейсом, что исключает технологический этап нанесения ТИМ



у конечного потребителя и упрощает и существенно ускоряет монтаж модулей.

В рамках исследования TIM компаний «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» было протестировано три типа теплопроводящих материалов:

1. Силиконовая термопаста.
2. Графитовая подложка.
3. PCM (парафиносодержащий).

Толщина слоя TIM

Для того чтобы минимизировать собственное тепловое сопротивление термоинтерфейса, необходимо подобрать минимально достаточную толщину слоя TIM, которая способна компенсировать неровности основания модуля и охладителя. На основе опыта применения теплопроводящих материалов для силовых полупроводниковых приборов, таких как IGBT-модули, оптимальная толщина слоя TIM составляет 50–90 мкм.

Процесс нанесения

Условно жидкие материалы, такие как силиконовая термопаста и PCM, наносились на основание модуля при помощи трафарета сотовой структуры. Применение трафарета данного типа обеспечивает равномерную толщину слоя и высокую повторяемость рисунка. Выбор рисунка обусловлен свойством шестиугольников наиболее эффективно заполнять площадь поверхности. Площадь и количество отверстий в совокупности с толщиной трафарета позволяют обеспечить необходимую толщину и равномерность слоя TIM. Структура трафарета для нанесения, используемого в процессе испытаний, представлена на рис. 2а.

Неоднородность рисунка трафарета необходима для компенсации деформаций основания, вызванных внутренней топологией IGBT-модуля. Как видно из рис. 2б, с использованием такого типа трафарета происходит полное распределение материала. В местах, где обеспечивается прямой контакт металл-металл, например в области монтажных отверстий, попадание TIM при монтаже модуля нежелательно, поскольку препятствует нормальному распределению материала в центре основания модуля.

После нанесения PCM на основание модуля материал необходимо подвергнуть сушке, так как в его составе находится растворитель. Наличие растворителя необходимо для упрощения процесса нанесения.

В отличие от термопаст силиконовые и графитовые подложки не нуждаются в дополнительном оборудовании для нанесения.

Испытания материалов

Основной критерий сравнения материалов — изменение значения теплового сопротивления «основание модуля — охладитель» $R_{th(c-h)}$. Наибольшее влияние на данный параметр оказывает длительное воздействие повышенной температуры. В качестве сравнительного испытания было проведено высокотемпературное хранение (тестирование на старение). Методика проведения испыта-

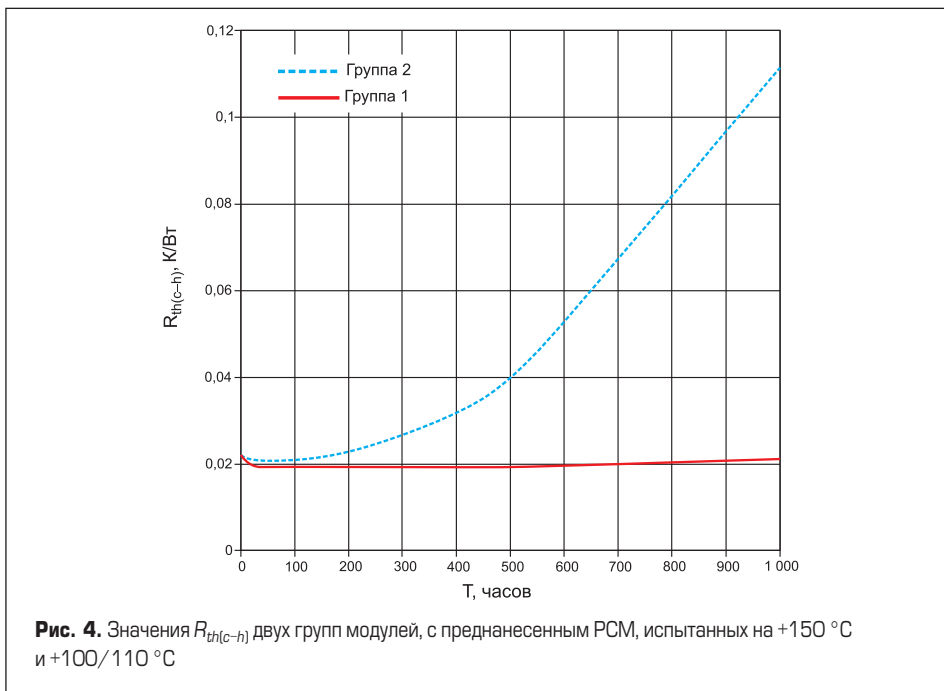


Рис. 4. Значения $R_{th(c-h)}$ двух групп модулей, с преднанесенным РСМ, испытанных на +150 °С и +100/110 °С

ний: модули монтируются на алюминиевую пластину через один из типов ТИМ (силиконовая термопаста, РСМ и графитовая подложка). Затем сборка устанавливается на охладитель через силиконовую термопасту. В основании модуля, непосредственно под чипами, а также в алюминиевой пластине просверлены отверстия для установки термодатчиков. Схема установки для испытаний представлена на рис. 3.

Для проведения высокотемпературного хранения модулей с преднанесенным РСМ были выбраны две группы, которые испытывались в различных режимах:

• Группа 1.

Модули испытывались при температуре $T = +100\text{ °C}$ в течение 500 ч, после чего температура была увеличена на 10 °C (до +110 °C), и испытания продолжились еще 500 ч. Общее время испытаний модулей суммарно составило 1000 ч.

• Группа 2.

Модули испытывались при температуре $T = +150\text{ °C}$ в течение 1000 ч без изменений температурного режима.

Основным критерием выбора температуры для испытаний РСМ является наличие парафина в составе материала. Температура испарения парафина при нормальных атмосфер-

ных условиях равна +90 °C, но так как материал находится в ограниченном пространстве под давлением, испытания проводились при более высоких температурах.

Силиконовая теплопроводящая паста и графитовые подложки были испытаны на температурах +150 и +135 °C соответственно.

Результаты испытаний представлены на рис. 4 и 5.

До проведения высокотемпературного хранения наибольшее значение $R_{th(c-h)}$ показала силиконовая термопаста. Также в процессе испытаний она продемонстрировала наибольший рост значения теплового сопротивления. После 1000 ч испытаний силиконовая термопаста частично высохла и потрескалась.

Графитовые подложки, как видно из результатов испытаний, показали наименьшее первоначальное значение теплового сопротивления $R_{th(c-h)}$. После 500 ч испытаний их тепловое сопротивление стабилизировалось на уровне 0,0193 К/Вт и сохранялось до окончания высокотемпературного хранения.

Для модулей с преднанесенным РСМ, в группе 1, значение $R_{th(c-h)}$ снизилось и стабилизировалось на отметке 0,0193 К/Вт до момента повышения температуры до +110 °C (после 500 ч), далее наблюдается постепенный рост

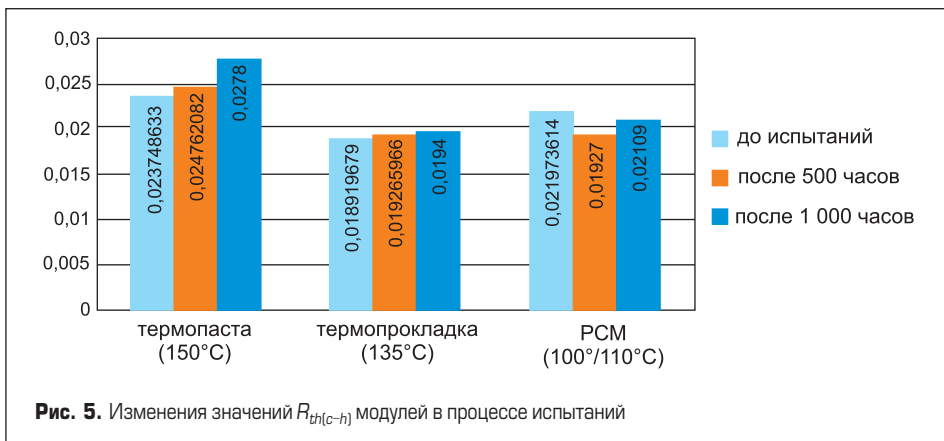


Рис. 5. Изменения значений $R_{th(c-h)}$ модулей в процессе испытаний

значения $R_{th(c-h)}$, и после 1000 ч испытаний оно составило 0,0211 К/Вт. После демонтажа модулей материал сохранил способность изменения фазового состояния и при нагревании выше +45 °C РСМ переходил из твердого состояния в жидкое.

Для модулей с преднанесенным РСМ, в группе 2, так же как и в группе 1, заметно снижение и стабилизация значения $R_{th(c-h)}$, однако после отметки примерно в 100 ч наблюдается рост теплового сопротивления. К отметке в 1000 ч значение $R_{th(c-h)}$ превысило 0,1100 К/Вт. После испытаний ТИМ утратил способность изменять фазовое состояние. В процессе испытаний парафин испарился из состава материала, ТИМ потерял свои phase-change-свойства и полностью высох. В таком состоянии РСМ трудноудаляем с поверхностей модуля и охладителя без механической обработки.

Закключение

Из проведенных испытаний можно сделать вывод, что применение парафиносодежащего РСМ при температуре основания модуля свыше +100 °C нежелательно и с течением времени может привести к отказу IGBT из-за перегрева. Однако при обеспечении должного охлаждения и соблюдения режимов работы приборов, при которых основание модуля не будет разогреваться свыше +100...+110 °C, у РСМ есть ряд преимуществ, а именно:

- низкая стоимость материала относительно теплопроводящих прокладок;
- стойкость к капиллярным и ринг-эффектам;
- стойкость к пересыханию в течение длительного времени;
- возможность поставки модулей с уже преднанесенным на основание материалом.

Графитовые термопрокладки возможно использовать для высоконагруженных систем, там, где важна высокая мощность и где температуры основания модуля будут близки к максимально допустимым. Графитовые подложки практически не подвержены эффектам старения и негативному влиянию циклических температурных воздействий, данный тип материала не выдавливается из-под основания модуля и при монтаже полностью повторяет форму основания модуля и охладителя, что обеспечивает плотное прилегание к контактными поверхностям. Благодаря вышперечисленным преимуществам графитовые подложки прослужат гораздо дольше термопаст или силиконовых термопрокладок. Также к преимуществам графитовых подложек следует отнести возможность их многократного использования.

Как показывают испытания, не стоит списывать со счетов и силиконовые термопасты. Несмотря на все свои недостатки, силиконовая термопаста по-прежнему остается самым дешевым теплопроводящим материалом, имеющим достаточно низкое тепловое сопротивление. При работе модулей на температурах, не превышающих +130 °C, силиконовая термопаста может обеспечить продолжительный ресурс работы модуля до его замены.