

Главное — не перегреть!

Силовые модули для гибридного и электрического транспорта

Силовые ключи, работающие в инверторах транспортных приводов, подвергаются постоянному воздействию высоких перепадов температуры. Жесткие тепловые режимы и неоптимальные условия охлаждения ограничивают мощностные характеристики силовых модулей и сокращают срок их службы. Для применения на транспорте необходима разработка специализированных компонентов, способных работать в жестких климатических условиях и выдерживать более 3 млн активных термоциклов. Использование последних поколений полупроводниковых кристаллов и внедрение новейших технологий корпусирования является ключевым фактором обеспечения надежности транспортного привода.

**Фолкер Демут
(Volker Demuth)**

**Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

В настоящее время в автомобильных применениях работает около 4% от общего количества выпускаемых в мире силовых модулей. Ожидается, что в ближайшие годы этот сектор будет расти со скоростью более 20% в год. Современная силовая электроника создает необычайно широкие возможности для развития различных видов электротранспорта, электроприводы нужны в гибридных грузовиках и автобусах, сельскохозяйственных машинах, электро- и гибридомобилях, строительных машинах и т. п.

Поскольку конкретные требования к инвертору в высокой степени зависят от области применения, усилия производителей силовых модулей направлены в первую очередь на обеспечение их высокой надежности. Сказанное касается полупроводниковых кристаллов и технологий их корпусирования. Самым распространенным способом соединения кремниевых чипов

с керамической DBC-подложкой в стандартных и «безбазовых» модулях до недавнего времени была пайка. С 2008 года компания SEMIKRON стала внедрять технологию низкотемпературного спекания серебряной нанопасты. Эти методы имеют свои достоинства и недостатки, в рамках данной статьи наибольший интерес представляет вопрос, касающийся их применимости для электрического и гибридного транспорта.

Изменения температуры окружающей среды, например при жидкостном охлаждении, создают так называемые пассивные термоциклы. В дополнение к ним потери мощности силовых полупроводников приводят к кратковременным (5–20 с) колебаниям температуры с градиентом ΔT от 40 до 60 °C, называемым активными термоциклами. Из-за разницы коэффициентов теплового расширения (КТР) сопрягающихся материалов каждый такой цикл создает термомеханический стресс, что в конечном итоге приводит к накоплению усталости в соединительных слоях и их постепенному разрушению [1].

Проблема паяных соединений

Использование технологии прижимного контакта и исключение базовой платы в модулях серии SKiiP, разработанных в начале 1990-х годов, позволило существенно повысить надежность и стойкость к термоциклированию (рис. 1). Устранение паяных связей дало возможность избавиться от основной причины отказов компонентов традиционной конструкции — накопления усталости в жестких контактных слоях. Следующим шагом стало внедрение технологии низкотемпературного спекания чипов, в результате чего традиционная пайка была заменена гораздо более стабильным соединением с помощью серебряной пасты [2]. Температура плавления серебра в 6 раз выше, чем у любого из используемых в промышленности припоев, кроме того, этот материал обладает лучшей теплопроводностью и более высокой механической гибкостью.



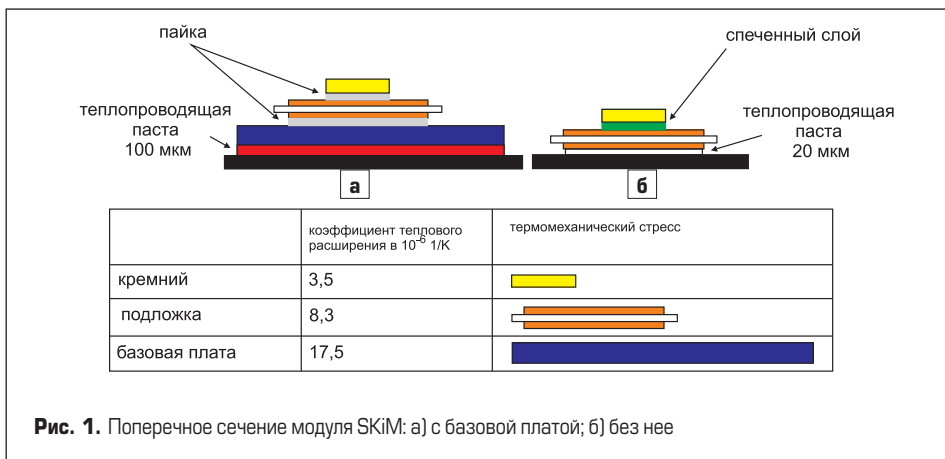


Рис. 1. Поперечное сечение модуля SKiM: а) с базовой платой; б) без нее

Прижимные модули имеют еще одно неоспоримое преимущество: отсутствие так называемого «биметаллического эффекта» позволяет более чем в 3 раза уменьшить толщину слоя теплопроводящей пасты при установке на радиатор. Отметим, что теплопроводящий материал вносит значительный вклад в общее значение теплового сопротивления силового модуля. У компонентов традиционной конструкции номинальное значение толщины слоя пасты составляет 75–100 мкм, что необходимо для компенсации изгиба базы вследствие упомянутого выше эффекта. Для прижимных модулей эта величина составляет 20–30 мкм и она определяется в первую очередь неоднородностью и шероховатостью поверхности радиатора и DBC-подложки.

В результате описанных мер удалось существенно снизить уровень термомеханических стрессов и повысить надежность модулей, что подтверждается в ходе ускоренных испытаний на воздействие тепловых ударов с градиентом $-40/125$ °С. Установка кристаллов методом спекания позволила повысить стойкость компонентов прижимного типа к термоциклированию почти в 15 раз.

Модули стандартной конструкции еще долго будут востребованы в применениях с постоянной или медленно меняющейся нагрузкой. В этих условиях базовая плата играет положительную роль, способствуя лучшему

распределению тепла между чипами, установленными на подложке. Решение проблемы тепловых стрессов в данном случае достигается за счет уменьшения площади DBC-подложки и, соответственно, площади ее контакта, как это сделано в силовых ключах семейства SEMiX. Следует отметить, что у модулей прижимного типа практически нет ограничений по площади подложки.

Оптимизация распределения тепла

Эта глава посвящена проблеме распределения тепла при различной топологии кристаллов на примере 3-фазного модуля с номинальным током 400 А и напряжением «коллектор–эмиттер» 600 В. Рассматривается стандартный конструктив с базовой платой, одиночный ключ состоит из 2 чипов IGBT и 2 диодов с номинальным током 200 А. Таким образом, в каждой фазе инвертора использовано по 4 кристалла IGBT/FWD. Аналогичный элемент безбазового модуля включает 4×100 А чипа IGBT и 4×200 А диода, то есть 8×IGBT и 4×FWD на фазу. Площадь подложки компонента прижимного типа примерно на 10% больше, чем у стандартного модуля (рис. 2).

Наличие потерь проводимости и переключения, генерируемых при работе инвертора, приводит к нагреву кристаллов. Тепловое

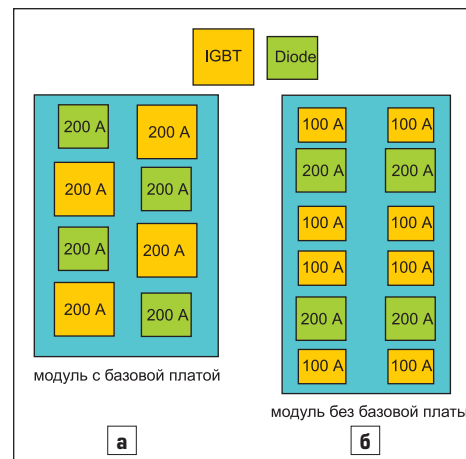


Рис. 2. а) Топология расположения кристаллов в модуле с базовой платой при установке 4 чипов IGBT (200 А) и 2 чипов диодов (200 А); б) топология «безбазового» модуля SKiM с 8 кристаллами IGBT (100 А) и 2 диодами (200 А) на подложке большего размера для лучшего распределения тепла

моделирование, проводимое с помощью 3D-метода конечных элементов (FEM), позволяет получить картину распределения тепла на DBC-подложке и в радиаторе при различных условиях эксплуатации. Например, при разгоне гибридного или электрического привода основная часть потерь создается IGBT, кристаллы диодов при этом работают с низкой нагрузкой.

Вот почему на представленных диаграммах (рис. 3) чипы IGBT имеют насыщенный красный цвет и, соответственно, наибольшую температуру. В стандартном модуле основная часть тепла сконцентрирована в центре подложки, на которой размещена вся 3-фазная схема. Из-за близкого расстояния между фазными стойками и кристаллами возникает взаимная тепловая связь, при этом самыми «горячими» являются IGBT среднего полумоста. Хотя при данных условиях эксплуатации диоды оказываются недогруженными по току, в центральной фазе их разогревают расположенные рядом транзисторы. В край-

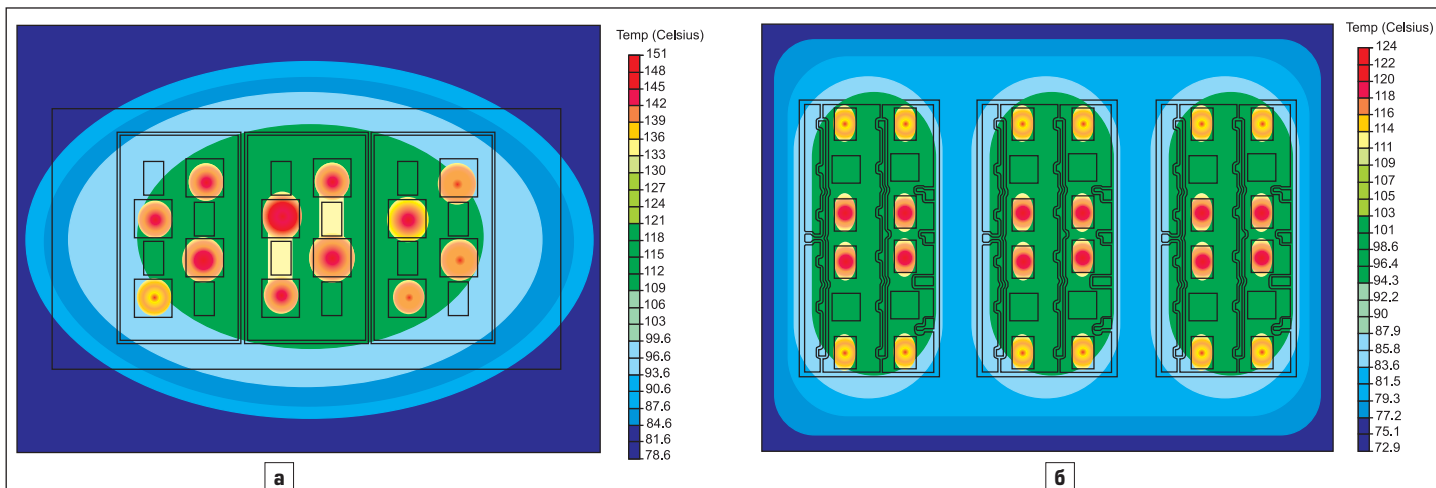
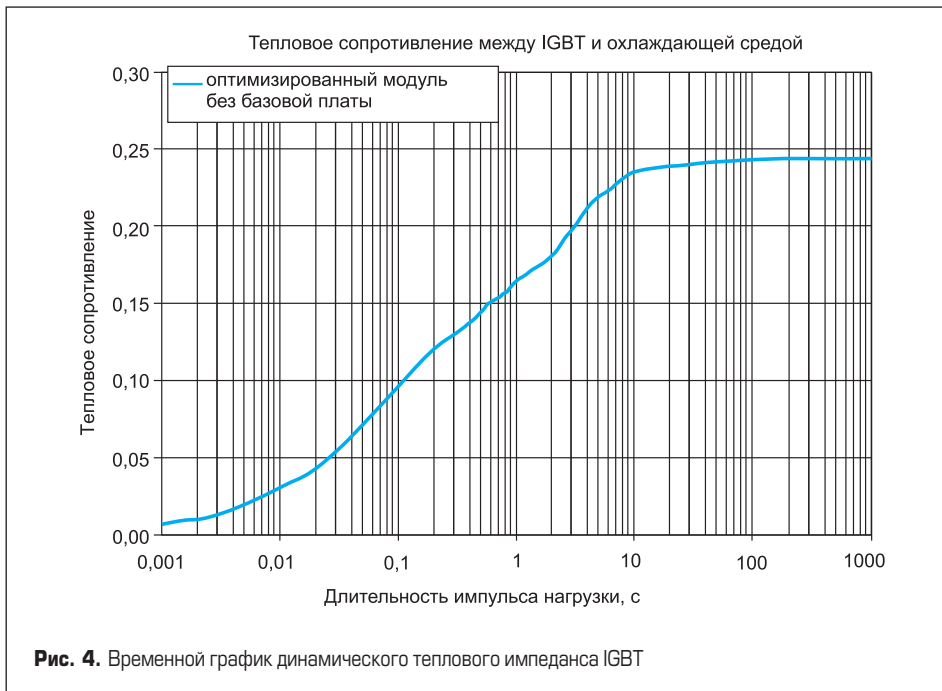


Рис. 3. Распределение температуры в модуле: а) с базовой платой; б) в «безбазовом» модуле SKiM (условия эксплуатации: напряжение питания — 350 В, выходной ток — 250 А, выходное напряжение — 220 В, частота обигашающей — 50 Гц, частота ШИМ — 12 кГц, $\cos\phi = 0,85$, температура тосола — 70 °С)



них стойках температура FWD оказывается ниже примерно на 15 °С.

Несмотря на наличие базовой платы, силовые чипы в крайних областях подложки заметно «холоднее», чем в центре, что является результатом неоднородного распределения тепла в структуре инвертора. Тепловая нагрузка на IGBT центральной фазы примерно на 10 °С выше среднего значения, а разница между наиболее и наименее нагретыми транзисторами превышает 20 °С. В результате мощностные характеристики всего модуля оказываются ограниченными перегревом его центральной области. Очевидно, что условия охлаждения и нагрузка должны быть выбраны таким образом, чтобы температура в центре DBC-платы не превысила опасных значений. С другой стороны, независимо от режимов работы модуль испытывает наибольший термомеханический стресс в области средней фазы, таким образом, разработчик должен проектировать инвертор и рассчитывать показатели надежности с учетом указанных факторов.

В «безбазовых» компонентах серии SKiM распределение тепла оказывается гораздо более равномерным, чем в модулях традиционной конструкции, несмотря на то, что, как и в предыдущем случае, основные зоны перегрева создаются кристаллами IGBT. Однако расстояние между источниками потерь и фазными DBC-подложками в прижимном модуле несколько больше. В результате этого энергия потерь отводится более эффективно, существенно ослабленным оказывается и эффект взаимной тепловой связи между чипами и каскадами инвертора.

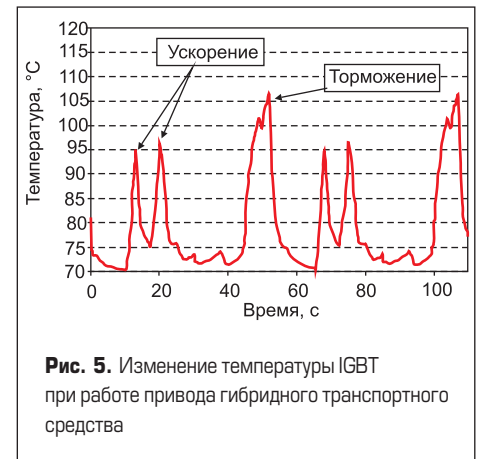
Гомогенное распределение тепла в теле модуля означает, что токовая нагрузка равномерна как для фаз инвертора, так и для ключей в пределах одной фазы. В результате этого близкой оказывается и температура всех кристаллов IGBT/FWD инвертора, отсутствуют зоны локального перегрева, что очень важно для обеспечения надежности. Измеренный

градиент между самым «холодным» и «горячим» чипом IGBT модуля SKiM не превышает 10 °С, что свидетельствует о минимальном разбросе токов. В этих условиях можно оптимизировать режимы работы системы охлаждения и обеспечить высокую эффективность работы всей системы.

Необходимо отметить, что наличие датчика температуры на каждой фазной DBC-подложке позволяет проводить непрерывный мониторинг состояния инвертора и исключить возникновение критического перегрева.

Нагрев и срок службы

При анализе тепловых режимов работы инвертора в реальных условиях необходимо принимать во внимание временную зависимость теплового сопротивления силовых модулей. При движении автомобиля с электри-

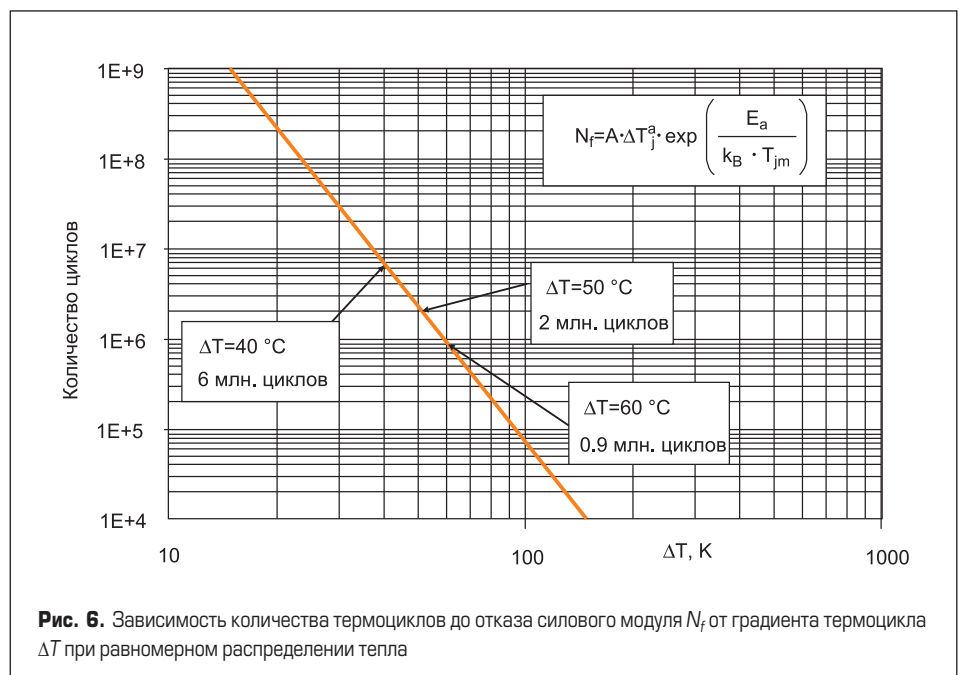


ческим или гибридным приводом существует три основных режима изменения нагрузки:

- Ускорение: ток IGBT максимален.
- Замедление: энергия, генерируемая электромотором, идет на заряд батареи, обратные диоды IGBT испытывают максимальную токовую нагрузку.
- Движение с постоянной скоростью: промежуточный режим.

Чтобы описать времязависимый процесс разогрева инверторного силового модуля, необходимо исследовать его поведение при воздействии циклов нагрузки длительностью 0,1–30 с. Динамическое тепловое сопротивление для обоих типов IGBT растет при увеличении длительности импульса нагрузки t_p , как показано на рис. 4. Тепло, генерируемое полупроводниковыми чипами, начинает распространяться по направлению к радиатору, вызывая нагрев всего силового ключа. При значении t_p больше 30 с, модуль успевает разогреться полностью, динамический тепловой импеданс Z_{th} перестает увеличиваться и достигает статического значения R_{th} .

Зависящая от времени величина Z_{th} используется для расчета тепловых режимов силовых модулей в реальных условиях эксплуатации. Для анализа прежде всего необходимо опреде-



лить характер изменения токовой нагрузки инвертора в процессе его эксплуатации.

Рассмотрим для примера цикл работы гибридного автомобиля (рис. 5). При запуске привода и в процессе разгона энергия берется из батареи и направляется в электрический мотор через инвертор. Выходная мощность при этом достигает как минимум 60 кВт, а температура IGBT повышается до 95 °С по мере роста тока. На этапе номинальной скорости от инвертора требуется гораздо меньшая мощность, и температура полупроводниковых чипов падает. В фазе торможения целью системы управления приводом является возвращение максимально возможного количества энергии обратно в батарею. При этом потери транзисторов и диодов становятся примерно одинаковыми, рассеяние тепла достигает своего максимума, и перегрев кристаллов IGBT достигает почти 110 °С.

Максимальный относительный перегрев IGBT в данном случае составляет $\Delta T = 40$ °С, при таком градиенте модуль способен выдержать в течение срока службы около 6 млн

циклов (рис. 6). Важность равномерного распределения тепла в теле силового модуля для обеспечения высокой надежности подтверждается тем фактом, что при увеличении градиента температуры всего на 10 °С ($\Delta T = 50$ °С) количество циклов до отказа сокращается в 3 раза, то есть до 2 млн. Если ΔT возрастает на 20 °С, величина N_f уменьшается уже в 6 раз. Таким образом, для обеспечения высокого срока службы силового ключа проектирование его конструкции должно производиться с учетом однородности источников потерь и отсутствия взаимной тепловой связи.

Заключение

Основной причиной отказов классических силовых ключей с паяным соединением базовой платы и силовых кристаллов являются термомеханические стрессы, возникающие вследствие разницы КТР сопрягающихся элементов. Использование модулей прижимной конструкции и внедрение технологии спекания для установки чипов IGBT/FWD позволяет значительно повысить надежность силовой

секции привода гибридных и электрических транспортных средств.

Оптимизация топологии изолирующей подложки позволяет обеспечить равномерное распределение тепла между генерирующими потери силовыми полупроводниками. При этом все чипы 3-фазного инверторного модуля находятся в одинаковых тепловых режимах, исключается опасность возникновения зон локального перегрева. «Безбазовые» силовые ключи со спеченными кристаллами обеспечивают гораздо более высокую стойкость к активному и пассивному термоциклированию, чем стандартные компоненты. Опыт эксплуатации транспортных средств и ускоренные испытания транспортных модулей нового поколения SKiM и SKAI подтверждают этот факт.

Литература

1. Колпаков А. О термоциклах и термоциклировании // Силовая электроника. 2006. № 2.
2. Göbl С. Технология спекания в силовых модулях // Компоненты и технологии. 2009. № 7.