

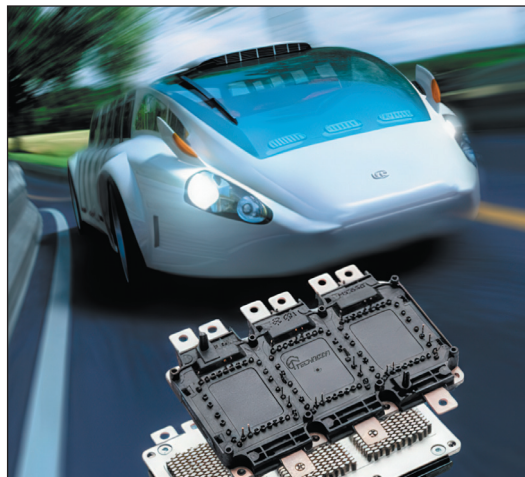
# HPD TECHNICON:

## силовые модули для гибридного и электрического транспорта

**Силовые ключи, работающие в тяговых транспортных приводах, подвергаются постоянному воздействию высоких перепадов температуры. Жесткие тепловые режимы, неоптимальные условия охлаждения ограничивают мощностные характеристики полупроводниковых модулей и сокращают срок их службы. Рынок электротранспорта нуждается в специализированных приборах, способных функционировать в жестких климатических условиях и выдерживать более 3 млн активных термоциклов. Использование последних поколений полупроводниковых IGBT- и SiC-кристаллов и внедрение новых технологий корпусирования становится ключевым фактором обеспечения надежности тягового привода.**

Андрей Колпаков

akolpakov@unirec.ru



**Рис. 1.** TECHNICON HPD — трехфазный инвертор для электрического и гибридного транспорта

**В** настоящее время в автомобильной индустрии работает около 10% от общего количества выпускаемых в мире силовых модулей, и этот сектор постоянно растет. Современная силовая электроника создает необычайно широкие возможности для развития различных видов электротранспорта: электроприводы нужны в электро- и гибридомобилях, электрических грузовиках и автобусах, сельскохозяйственных и строительных машинах и т. п.

Поскольку конкретные требования к тяговому инвертору в высокой степени зависят от области применения, усилия производителей силовой электроники направлены в первую очередь на повышение надежности компонентов, внедрение новых полупроводниковых технологий и методов корпусирования.

Самым распространенным способом соединения силовых чипов с изолирующей DBC-подложкой, а также подложки с базовой платой является пайка,

однако именно она рассматривается как основная причина отказов транспортных модулей, работающих в условиях циклического изменения нагрузки. Развитие электрического транспорта потребовало поиска новых технологий соединения, самой перспективной из которых считается низкотемпературное спекание.

### **Проблема традиционных конструкций: паяные соединения и термопаста**

Изменения температуры окружающей среды создают так называемые пассивные термоциклы, но больше всего на ресурс полупроводниковых приборов воздействуют активные термоциклы, возникающие при периодическом изменении нагрузки. Это приводит к кратковременным (5–20 с) колебаниям температуры кристаллов с градиентом  $\Delta T$  40–60 °С. Из-за разницы КТР (коэффициент теплового расширения) сопрягающихся материалов каждый такой цикл создает термомеханический стресс, что в конечном итоге ведет к накоплению усталости и постепенному разрушению жестких паяных и сварных соединений силового модуля [1].

Эту проблему во многом решает замена пайки на низкотемпературное спекание серебряной пасты, создающее гораздо более надежную и стабильную связь [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. Технология двухстороннего спекания используется для установки карбидокремниевых чипов (SiC MOSFET + SiC Шоттки) на изолирующую подложку в модулях HPD SiC, рассчитанных на особо жесткие условия применения.

Базовая плата HPD выполняет функцию радиатора с прямым охлаждением, что позволяет решить еще одну важную проблему — избавиться от слоя термопасты, необходимой при монтаже стандартных

приборов на теплосток. Отметим, что любой теплопроводящий материал TIM (Thermal Interface Material) вносит значительный вклад в общее значение теплового сопротивления силового модуля. Например, у компонентов традиционной конструкции номинальное значение толщины слоя пасты составляет 75–100 мкм, это необходимо для компенсации биметаллического эффекта, а также неоднородности и шероховатости поверхности радиатора. При жидкостном охлаждении, характерном для транспортного привода, вклад слоя TIM в общее значение теплового сопротивления  $R_{th}$  может превышать 50%, что видно из таблицы 1.

Следующим шагом на пути повышения стойкости к термоциклированию является замена традиционного оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) на композитный материал — нитрид кремния ( $Si_3N_4$ ), использованный в модулях HPD Technipon для изготовления изолирующей DBC-подложки. Этот композит имеет гораздо лучшее согласование по КТР с медной базовой платой. В результате удалось существенно снизить уровень термомеханических стрессов и повысить надежность компонентов, что подтверждается в ходе ускоренных испытаний на воздействие тепловых ударов с градиентом  $100\text{ }^\circ\text{C}$  при предельной температуре чипов  $+175\text{ }^\circ\text{C}$ .

На рис. 2 показан типовой профиль работы тягового привода электромобиля мощностью 50 кВт. В процессе разгона энергия из батареи направляется в электрический мотор через инвертор, при этом температура чипов IGBT повышается примерно до  $+95\text{ }^\circ\text{C}$  по мере роста тока. На этапе движения с постоянной скоростью 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  $+110\text{ }^\circ\text{C}$ .

Максимальный относительный перегрев кристаллов IGBT в данном случае составляет  $\Delta T = 40\text{ }^\circ\text{C}$ , и важно, чтобы при таком градиенте силовой модуль сохранял работоспособность в течение всего срока службы. Соответственно, усталостные процессы, накапливающиеся в конструктивных слоях в результате воздействия термомеханических стрессов, не должны приводить к изменениям электрических и тепловых характеристик прибора. Как видно из графика зависимости количества термоциклов от градиента температуры (рис. 3), полученного в ходе ускоренных испытаний, при  $\Delta T = 40\text{ }^\circ\text{C}$  модуль HPD способен выдержать около 6 млн циклов в течение срока службы.

Для обеспечения высокой надежности очень важна равномерность распределения тепла по подложке силового ключа, чтобы исключить дополнительный нагрев чипов из-за тепловой связи. На рисунке видно,

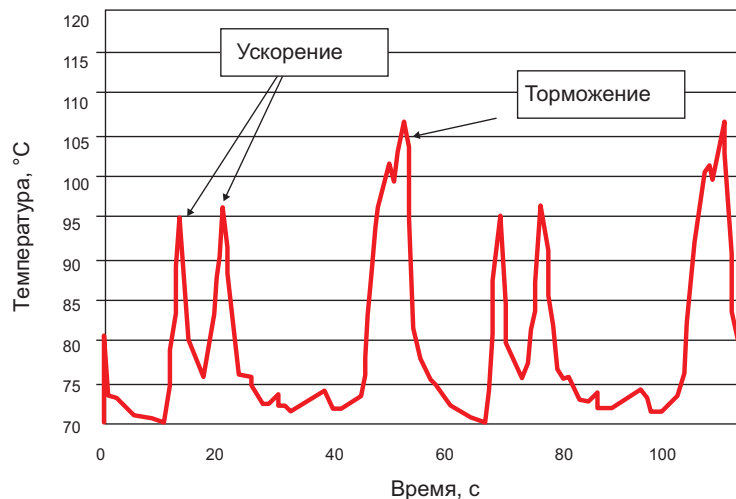


Рис. 2. Изменение температуры IGBT при работе привода гибридного транспортного средства

Таблица 1. Теплопроводность основных материалов силовых полупроводниковых модулей

Материал	Удельная теплопроводность $\lambda$ , Вт/м·К	Толщина слоя, мкм	Соотношение $R_{th}$ %
Кристалл (Si)	106	120	2,92
Паяный слой кристалла	57	70	3,65
Омеднение DBC-подложки (верхний слой)	394	300	1,94
DBC-подложка ( $Al_2O_3$ )	24	380	32,91
Омеднение DBC-подложки (нижний слой)	394	300	1,94
Теплопроводящая паста (Wacker Chemie P12)	0,81	30	57,26

что при увеличении градиента температуры всего на  $10\text{ }^\circ\text{C}$  ( $\Delta T = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ) количество циклов до отказа сокращается в 3 раза, то есть до 2 млн. Если  $\Delta T$  возрастает на  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , величина  $N_f$  уменьшается уже в 6 раз. Таким образом, проектирование транспортных модулей должно производиться с учетом гомогенности источников потерь и минимизации взаимной тепловой связи. Конструкция приборов HPD полностью соответствует описанным требованиям.

### Технология прямого охлаждения pin-fin

Как правило, в приводах электромобилей используется жидкостное охлаждение, позволяющее снизить градиент температуры чипов и ее пиковое значение, увеличить плотность мощности и, соответственно, повысить ресурс изделия. На тепловое сопротивление жидкостных радиаторов и эффективность охлаждения влияют следующие факторы:

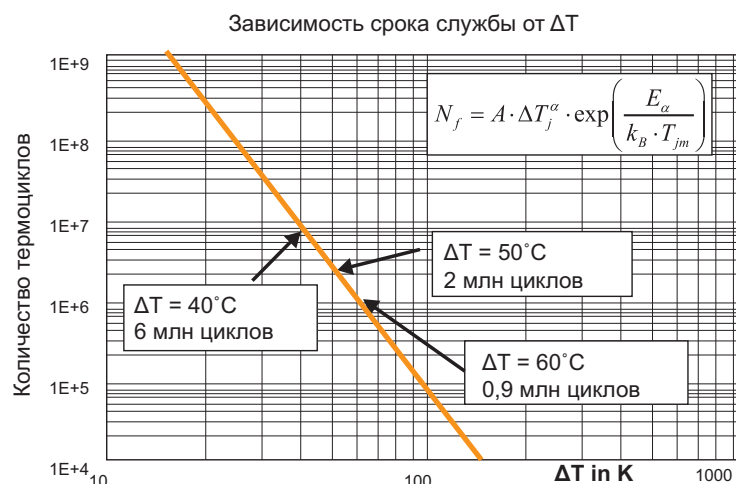
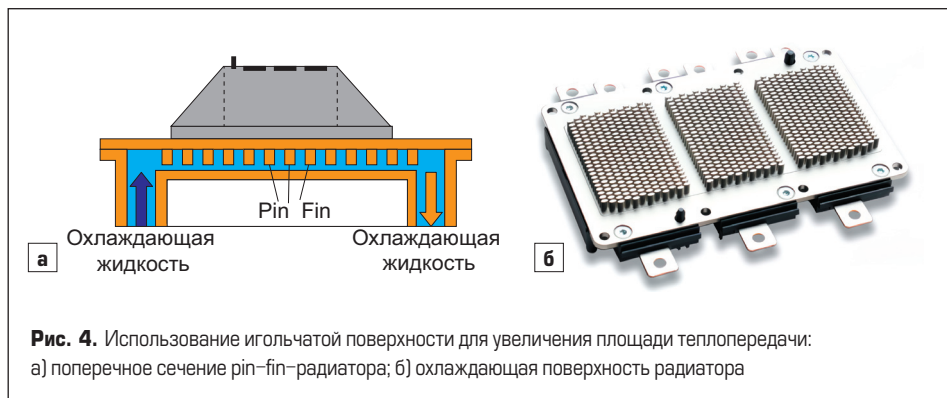
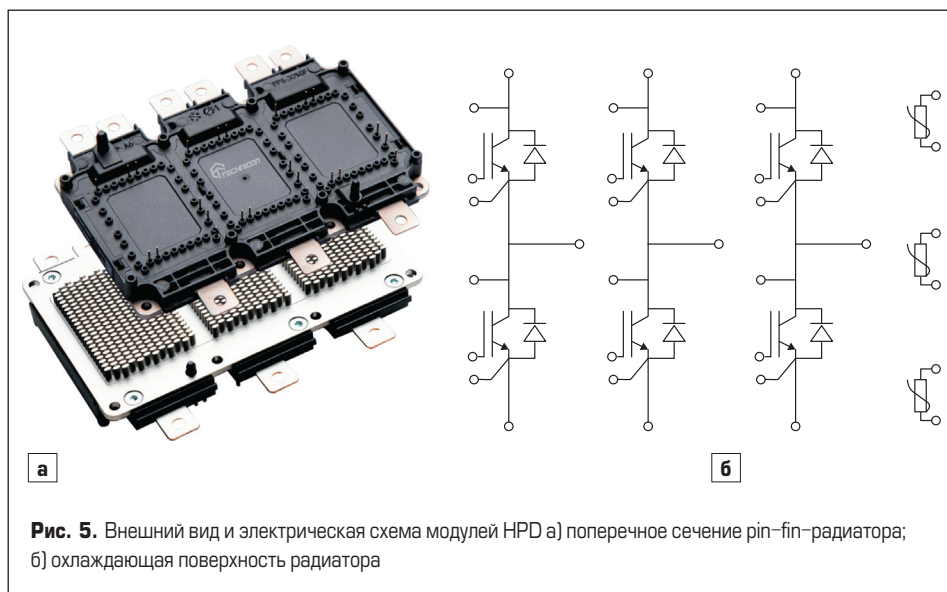


Рис. 3. Зависимость количества термоциклов до отказа силового модуля  $N_f$  от градиента термоцикла  $\Delta T$  для модуля HPD



**Рис. 4.** Использование игольчатой поверхности для увеличения площади теплопередачи: а) поперечное сечение pin-fin-радиатора; б) охлаждающая поверхность радиатора



**Рис. 5.** Внешний вид и электрическая схема модулей HPD а) поперечное сечение pin-fin-радиатора; б) охлаждающая поверхность радиатора

**Таблица 2.** Номенклатура и основные параметры модулей HPD TECHNICON

Тип модуля	Технология	$V_{CE}$ , В	$I_C$ , А	$V_{CE sat @ 25C}$ , В
TE600GD08C6R7	IGBT	750	600	1,35
TE950GD08C6R7	IGBT	750	950	1,43
TE1100GD12C6R7	IGBT	750	1100	1,25
TE600GD12C6R7	IGBT	1200	600	1,7
Тип модуля	Технология	$V_{DS}$ , В	$I_D$ , А	$R_{DS(on) @ 150C}$ , мОм
TE500SD12C6	SiC	1200	500	3,65
TE600SD12C6	SiC	1200	600	3,45

- объемная скорость потока жидкости (функция перепада давления);
- наличие турбулентности в каналах охлаждения;
- эффективная площадь охлаждения;
- теплоемкость охлаждающей жидкости, а также ее плотность и вязкость (например, при изменении соотношения вода/гликоль с 50:50% до 90:10% тепловое сопротивление снижается на 35–45%);
- тепловые свойства материала радиатора (например, тепловое сопротивление медных радиаторов примерно на 20% ниже, чем алюминиевых).

Увеличение эффективной площади контакта радиатора и жидкости улучшает теплопередачу. Игольчатый теплоотвод, использованный в модулях HPD, отличается большей эффективностью не только за счет расширения зоны контакта, но и благодаря образованию турбулентных потоков вокруг ребер pin-fin (рис. 4).

Равномерное распределение источников тепла (силовых ключей) по поверхности при

жидкостном охлаждении играет еще большую роль, чем при воздушном. Благодаря высокому коэффициенту теплопередачи (порядка 1000 Вт/м<sup>2</sup>·К) наиболее эффективный отвод тепла происходит в тех областях монтажной поверхности, где установлены полупроводниковые компоненты. Использование меди в качестве материала радиатора позволяет снизить объемное сопротивление, улучшить перекрестную тепловую связь и, следовательно, увеличить эффективную площадь охлаждения.

### TECHNICON HPD: номенклатура и основные параметры

Компактные трехфазные модули в корпусе С6 (HPD) предназначены для использования в инверторах гибридных и электрических транспортных средств. В силовых ключах серии HPD применяется два типа кристаллов: новейшие IGBT 7-го поколения со структурой MPT (Micro-Pattern Trench FS), оптимизированной для применения в электроприводах.

В этой технологии сочетаются высокая плотность тока, устойчивость к короткому замыканию и повышенное напряжение блокировки, что обеспечивает надежную работу инвертора в суровых условиях окружающей среды.

Также выпускается версия приборов с карбидокремниевыми чипами (SiC MOSFET + SiC Шоттки), предназначенных для работы на повышенных частотах. Основные характеристики модулей HPD приведены в таблице 2.

Все компоненты серии HPD имеют базовую плату, выполняющую функцию радиатора с прямым охлаждением, реализуемого за счет непосредственного контакта ребер pin-fin с охлаждающей жидкостью (рис. 5). Для повышения стойкости к термоциклированию изолирующая DBC-подложка сделана из композитного материала (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>).

### Заключение

Основной причиной отказов классических полупроводниковых приборов с паяным соединением кристаллов, изолирующей подложкой и базовой платой являются термомеханические стрессы, возникающие вследствие разницы КТР сопрягающихся материалов. Один из способов решения этой проблемы — использование новейших технологий кремниевых и карбидокремниевых чипов с низкими статическими и динамическими потерями. При прочих равных условиях это приводит к снижению потерь, то есть уменьшению температурных градиентов и общего перегрева чипов, соответственно, меньше становятся и тепловые удары, разрушающие конструкцию модуля.

Для повышения надежности силовых модулей, работающих в условиях высоких циклических нагрузок, свойственных транспортным приводам, производители переходят на более стойкие и эластичные припои, а также внедряют новые технологии соединений, например низкотемпературное спекание. Существенное улучшение тепловых характеристик достигается при использовании базовой платы, выполняющей функцию радиатора с прямым охлаждением pin-fin. Это устраняет необходимость применения теплопроводящей пасты и заметно снижает общее значение теплового сопротивления.

Оптимизация топологии изолирующей подложки обеспечивает равномерное распределение тепла между генерирующими потерями силовыми полупроводниками. При этом все чипы трехфазного инвертора находятся в одинаковых тепловых режимах, что исключает опасность возникновения зон локального перегрева. Все описанные инновации реализованы в транспортных модулях HPD, выпускаемых компанией TECHNICON.

### Литература

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