

Продолжение. Начало в №3'2012

# Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения.

Часть 3

Удельное значение мощности потерь, рассеиваемой в современных силовых модулях, достигает сотен Вт/см<sup>2</sup>, потери на кристаллах скоростных микроконтроллеров оказываются не намного меньше. Стремление к снижению габаритов и увеличению плотности мощности преобразовательных устройств неизбежно создает серьезные проблемы, связанные с отводом тепла. Достижения технологий IGBT последних лет привели к появлению кристаллов с предельно высокими значениями плотности тока, диапазон их рабочих температур расширен до 175 и даже 200 °С. В результате этого все более возрастает значение теплового перехода «корпус–радиатор–окружающая среда», а характеристики системы охлаждения становятся решающими при проектировании конструкции преобразователя.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Чтобы в полной мере реализовать нагрузочные возможности современных ключей, рассеиваемое ими тепло должно быть передано на радиатор через конструкционные и изолирующие слои силового модуля. Эффективность отвода мощности потерь  $P_{\text{top}}$  генерируемой в проводящем и заблокированном состоянии, определяется разницей температур кристалла  $T_j$  и радиатора  $T_s$ :

$$\Delta T_{j-s} = T_j - T_s$$

Для численной оценки уровня перегрева кристаллов при мощности рассеяния  $P_v$  используется величина теплового сопротивления  $R_{th(j-c)}$  в статическом состоянии и динамического теплового импеданса  $Z_{th(j-c)}$  в переходных режимах:

$$R_{th(j-c)} = \Delta T_{j-s} / P_v$$

**Таблица.** Теплопроводность, теплоаккумулирующая способность и коэффициент теплового расширения (КТР) основных материалов силовых модулей

Материал	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	Теплоаккумулирующая способность, кВт/(м·К)	КТР $\alpha_s \times 10^{-6}$ /К
Кремний	148	1650	4,1
Медь	394	3400	17,5
Алюминий	230	2480	17,5
Серебро	407	2450	19
Молибден	145	2575	5
Припой	≈70	1670	15–30
DBC Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24	3025	8,3
DBC AlN, AlN-AMB	180	2435	5,7
AlSiC (75% SiC)	180	2223	7

Ранее в документации встречался термин  $T_{vj}$ , где индекс «v» означает «виртуальную» температуру перехода, поскольку это значение может быть измерено только на прототипе или получено расчетным способом. Для модулей традиционной конструкции с базовой платой величина «внешнего» теплового сопротивления или динамического импеданса  $R_{th(c-s)}/Z_{th(c-s)}$  определяется между базой и радиатором, а «внутреннего»  $R_{th(j-c)}/Z_{th(j-c)}$  — между кристаллом и базовой платой. Справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} R_{th(j-s)} &= R_{th(j-c)} + R_{th(c-s)} \\ Z_{th(j-s)} &= Z_{th(j-c)} + Z_{th(c-s)} \end{aligned}$$

У прижимных модулей «безбазового» типа измерение этих характеристик невозможно из-за отсутствия корпуса (базы), поэтому в их спецификациях определяется только суммарное значение сопротивления между чипами и радиатором. Тепловые характеристики маломощных ключей, как правило, задаются относительно температуры окружающей среды ( $R_{th(j-a)}$ ).

На рис. 1 показана структура стандартного модуля с базовой платой и эквивалентная тепловая модель. Величина  $R_{th} = d/(\lambda \times A)$  может использоваться для оценки влияния конструкционного элемента на эффективность рассеяния тепла (или на значение сопротивления  $R_{th(j-s)}/Z_{th(j-s)}$ ), где  $d$  — толщина слоя,  $\lambda$  — теплопроводность,  $A$  — площадь теплового потока. Здесь рассматриваются следующие узлы силового модуля:

- кристалл (площадь, толщина, геометрия, расположение);

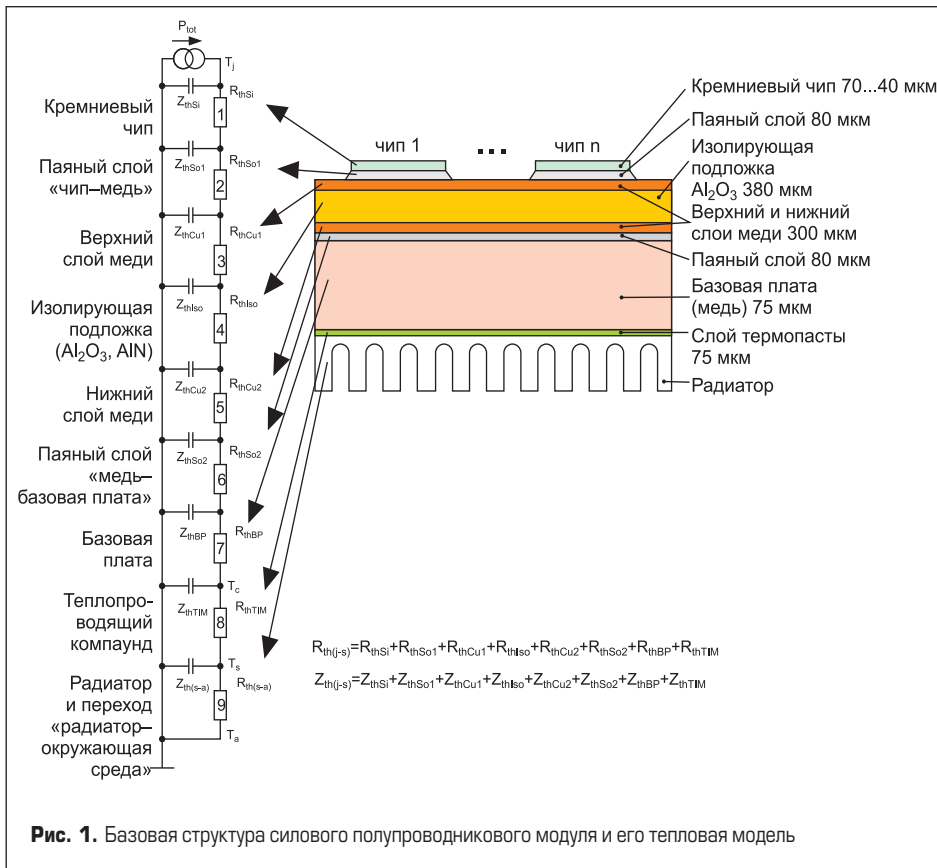


Рис. 1. Базовая структура силового полупроводникового модуля и его тепловая модель

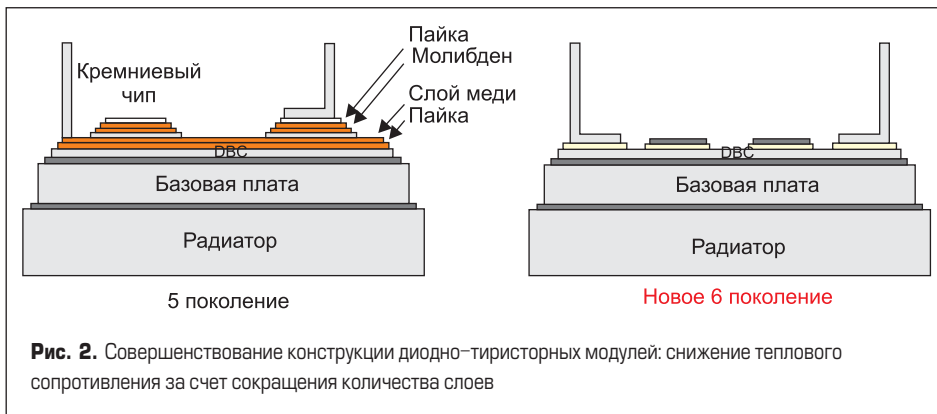


Рис. 2. Совершенствование конструкции диодно-тиристорных модулей: снижение теплового сопротивления за счет сокращения количества слоев

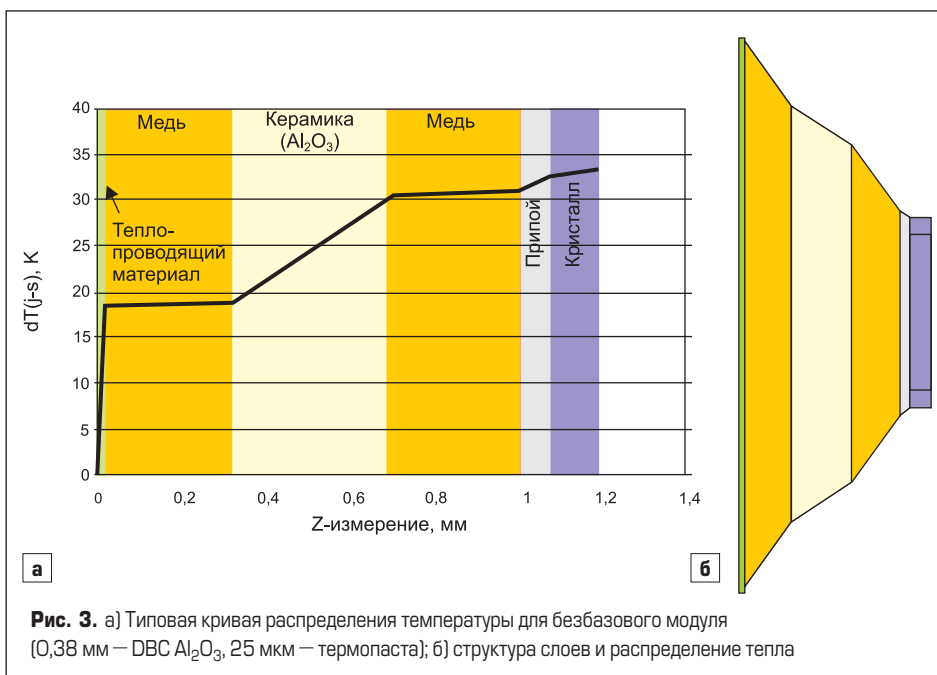


Рис. 3. а) Типовая кривая распределения температуры для безбазового модуля (0,38 мм – DBC Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 25 мкм – термопаста); б) структура слоев и распределение тепла

- изолирующая DBC-подложка (материал, толщина, структура верхнего слоя);
- соединительный слой «чип–подложка» (свойства припоя, адгезия и т. д.);
- базовая плата (материал, геометрия);
- соединительный слой «подложка–база» (свойства припоя, адгезия и т. д.);
- модуль в сборе (качество поверхностей, тепловой контакт с радиатором, толщина слоя термопасты и ее характеристики).

В соответствии с выражением для теплоемкости  $C_{th} = s \times V$  параметры эквивалентной схемы могут быть рассчитаны последовательно от слоя к слою ( $s$  = теплоаккумулирующая способность,  $V$  = объем). Эффективность передачи тепла при этом оценивается относительно площади и объема каждого элемента конструкции. В обязательном порядке следует анализировать проблему взаимного теплового влияния кристаллов, установленных в модуле.

Теоретическое расчетное значение теплового сопротивления зачастую получается ниже измеренной величины. Основной причиной этого является недостаточно точное описание процесса теплопередачи, а также взаимное влияние и краевые эффекты, которые невозможно учесть при моделировании. Вследствие этого эквивалентная схема, состоящая из RC-цепочек, не может точно отражать свойства сложных электронных систем. На практике, как правило, приходится адаптировать компьютерную модель путем измерения параметров  $R_{th}$  реальной системы и внесения соответствующих поправочных коэффициентов (таблица).

При заданных условиях охлаждения и состоянии окружающей среды величина  $R_{th(j-s)}$  определяет максимально допустимую мощность рассеяния силового модуля. Развитие технологий корпусирования, целью которых является снижение теплового сопротивления, идет по пути уменьшения количества конструктивных слоев и их толщины (например, 0,63–0,38 для керамики), а также использования новых материалов с повышенной теплопроводностью (AlN, графит). Однако возможности по улучшению тепловых характеристик ограничены требованиями по изоляции и механической прочности (рис. 2).

На рис. 3 показана расчетная кривая распределения температуры по слоям безбазового прижимного модуля с неравномерным характером теплопередачи. При моделировании в расчет принималась теплопроводность отдельных слоев и площадь теплового потока, с увеличением которой величина  $R_{th}$  для каждого последующего слоя падает. При использовании одномерной модели снижение толщины слоя меди приводит к уменьшению теплового сопротивления, однако в реальном трехмерном пространстве  $R_{th}$  прирастет из-за ухудшения распределения тепла. Применение более толстого омеднения DBC-подложки предпочтительнее с точки зрения тепловых характеристик, но при этом усиливается и термомеханическое воздействие на подложку.

Качество теплопередачи зависит не только от свойств конкретного конструктивного элемента, но и от характеристик следующего за ним слоя. Градиент температур должен вы-

браться таким образом, чтобы тепловой поток мог преодолеть сопротивление материала с худшей теплопроводностью. Это позволяет улучшить поперечное распределение тепла в расположенном выше слое лучшими тепловыми характеристиками. Снижение величины  $R_{th}$  может достигаться и за счет уникальных решений, таких как, например, «кремний на алмазной подложке», которые, возможно, найдут свое применение в специальных устройствах в будущем.

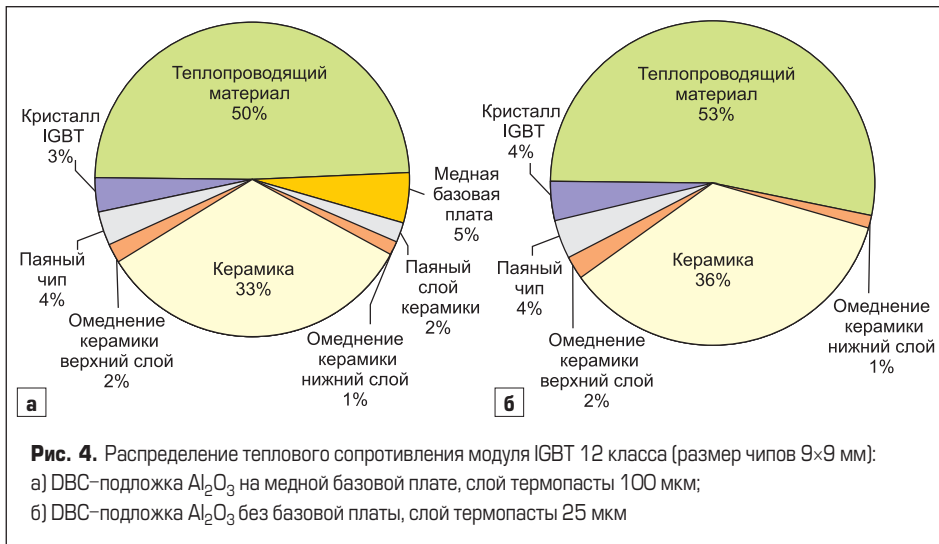
**Распределение теплового сопротивления по конструкционным слоям**

На рис. 4 показано, как тепловое сопротивление распределяется по слоям стандартного и безбазового модуля с подложкой из оксида алюминия. В обоих случаях наибольший вклад (около 50%) в суммарную величину  $R_{th(j-c)}$  вносит теплопроводящий компаунд TIM (Thermal Interface Material). На первый взгляд это кажется странным, поскольку базовая плата обеспечивает лучшее распределение тепла и, соответственно, снижает влияние слоя термопасты. Однако в реальности между базой и радиатором всегда существует зазор, обусловленный шероховатостью их поверхностей, а также изгибом, возникающим при пайке подложки на базовую плату. Для его компенсации используются разные технологические методы, например предварительный изгиб базы. Однако обеспечить абсолютную плоскостность невозможно, поскольку характеристики изгиба меняются в ходе пайки, что связано с процессом растекания припоя и изменением его температуры.

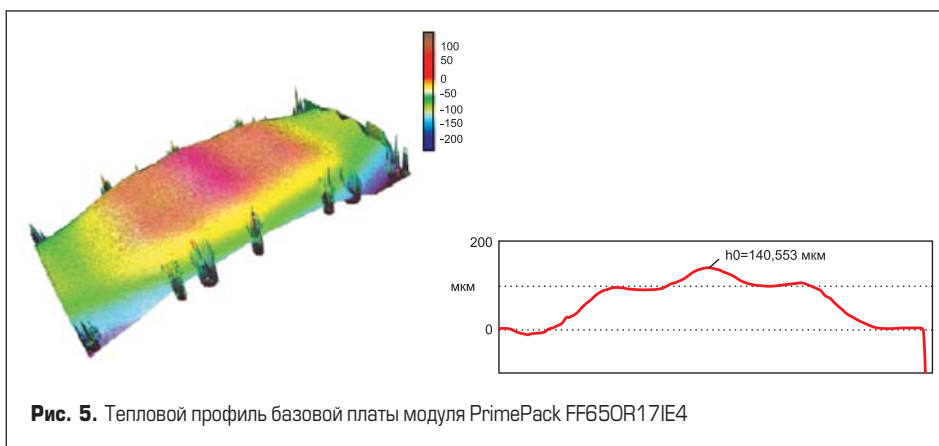
Предварительно изогнутая базовая плата, являющаяся монтажным основанием модуля, прижимается к радиатору за счет крепежных винтов, расположенных по ее краям (рис. 6) и создающих небольшое давление. Для улучшения теплового контакта и компенсации теплового расширения базы приходится использовать толстый слой термопасты (обычно 100–200 мкм), существенно увеличивающий тепловое сопротивление [2]. Эта проблема становится еще более критичной для мощных модулей с большой площадью основания. На рис. 5 отчетливо видны четыре зоны подъема температуры паяной DBC-подложки. Для снижения уровня перегрева в некоторых случаях используется разделенная база, на частях которой располагаются сегменты подложки [3].

Несмотря на высокую теплопроводность меди ( $\lambda = 393 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), базовая плата вносит заметный вклад в общее значение  $R_{th}$ , что обусловлено ее толщиной (2,5–5 мм). Снижение толщины базы не может заметно изменить процент теплового сопротивления в общем балансе, поскольку при этом ухудшается распределение температуры и, соответственно, уменьшается площадь области, через которую осуществляется отвод тепла от чипов.

Ряд фирм при производстве модулей высокой мощности (ток коллектора свыше 1000 А) использует композитный материал (AlSiC)



**Рис. 4.** Распределение теплового сопротивления модуля IGBT 12 класса (размер чипов 9×9 мм): а) DBC-подложка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на медной базовой плате, слой термопасты 100 мкм; б) DBC-подложка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> без базовой платы, слой термопасты 25 мкм



**Рис. 5.** Тепловой профиль базовой платы модуля PrimePack FF650R17IE4

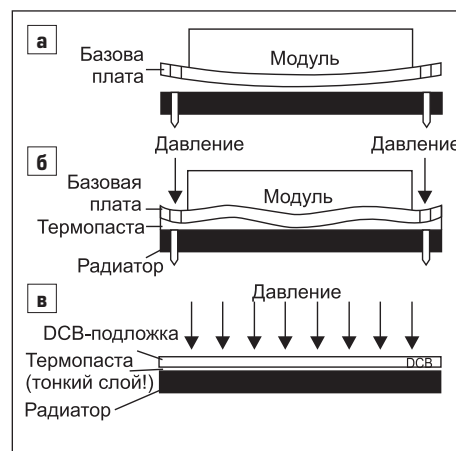
для изготовления базовой платы и нитрид алюминия (AlN) для изолирующей подложки. Это позволяет улучшить согласование коэффициентов теплового расширения ( $\alpha$ : AlN — 5,7 ppm, AlSiC — 7 ppm, Cu — 17 ppm), однако композит имеет худшую теплопроводность ( $\lambda = 180 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) по сравнению с медью и более высокую стоимость.

Кардинальным решением проблемы согласования КТР является разработанная компанией SEMIKRON в начале 90-х годов технология прижимного контакта, позволяющая устранить базовую плату из состава силового модуля и, соответственно, исключить термомеханические напряжения в ее соединительном слое.

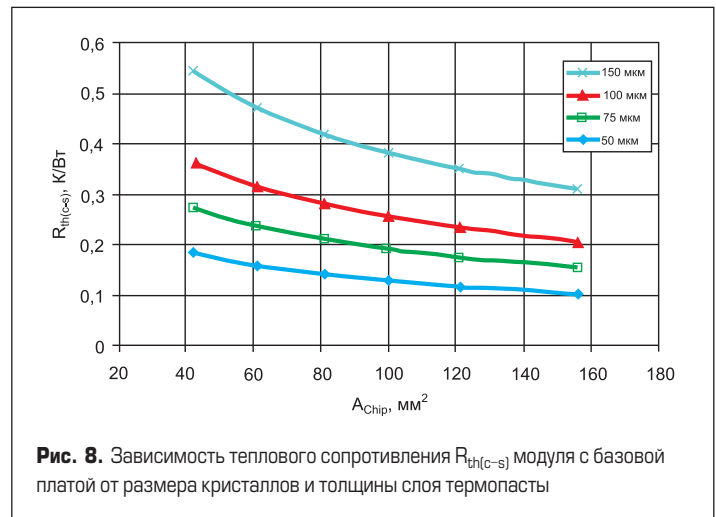
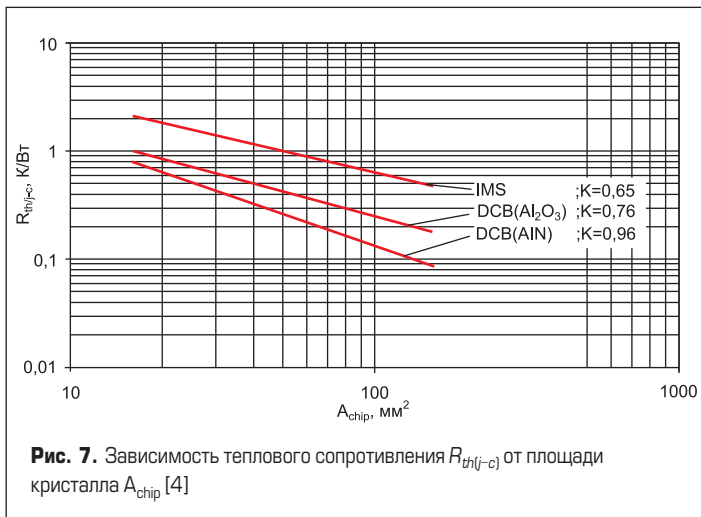
Ухудшение распределения тепла в основании модуля в этом случае компенсируется за счет снижения теплового сопротивления на долю, приходящуюся на базовую плату и ее паяный слой. Однако еще более важно, что отсутствие изгиба, вызванного биметаллическим эффектом, позволяет использовать гораздо более тонкий слой термопасты (20–30 мкм вместо 100 мкм) и таким образом существенно улучшить отвод тепла от кристаллов. В конструкции безбазовых модулей предусмотрена специальная прижимная пластина, осуществляющая давление на подложку в местах локального тепловыделения (рис. 6в). За счет этого заметно улучшается равномерность передачи тепла на радиатор.

Наибольший процент теплового сопротивления силовых модулей приходится на кера-

мическую изолирующую пластину. Отметим, что существуют маломощные IGBT/MOSFET в дискретных корпусах, в которых коллектор IGBT непосредственно соединен с теплопроводящим медным основанием. Однако при монтаже таких компонентов на радиатор приходится использовать внешние изоляторы, параметры которых хуже, чем у DBC-керамики. По сравнению со стандартной



**Рис. 6.** Проблема теплового контакта силового модуля и радиатора: а) модуль до установки на радиатор (базовая плата с технологическим изгибом); б) модуль после установки на радиатор (биметаллический эффект); в) модуль безбазовой конструкции (SEMIP, MiniSiKiiP, SKiiP)



подложкой из оксида алюминия  $Al_2O_3$  с чистотой 96% ( $\lambda = 24$  Вт/(м·К)) лучшими характеристиками обладает сверхчистый оксид ( $\lambda = 28$  Вт/(м·К)) и нитрид алюминия  $AlN$  ( $\lambda = 180-200$  Вт/(м·К)). Применение этого материала позволяет существенно снизить тепловое сопротивление модуля и, соответственно, улучшить его мощностные характеристики. Однако при этом резко возрастает и стоимость, поэтому  $AlN$  используется, в основном, в силовых ключах с большим напряжением изоляции, таким образом одновременно обеспечивается высокая диэлектрическая прочность и хорошая теплопроводность.

Паяное соединение чипов и DBC-подложки, а также подложки и базовой платы также вносит некоторый вклад в суммарную величину  $R_{th}$ . Устранение базы и замена пайки на новейшую технологию низкотемпературного спекания позволяет вдвое снизить их долю в общем балансе и улучшить теплопроводность.

Процент теплового сопротивления, вносимый керамической изолирующей платой, определяется структурой верхнего слоя омеднения, который используется для монтажа кристаллов и промежуточных соединений модуля. В то время как радиальный поток тепла в нижнем медном слое, соединенном с радиатором, практически не зависит от внешних факторов, интенсивность распределения тепла в верхнем слое ограничена геометрией медных площадок под чипами. Например, в [4] указано, что для кристалла площадью 42 мм<sup>2</sup> на DBC-подложке из оксида алюминия сопротивление  $R_{th(j-c)}$  увеличивается примерно на 15%, если площадь омеднения равна площади основания чипа (относительно варианта сплошного медного покрытия DBC-платы).

Тепловое сопротивление кремниевых чипов растет пропорционально их толщине, эта зависимость определяется блокирующим напряжением и технологией IGBT. Очевидно, что площадь, через которую тепловой поток от кристалла отводится на изолирующую подложку и далее на радиатор, определяется размерами его основания. В соответствии с общей формулой для  $R_{th}$  величина теплового сопротивления должна снижаться обратно пропорционально площади кристалла. Однако на практике увеличение отношения площади основания чипа

к его периметру ухудшает распределение температуры. Если, например, кристалл 9×9 мм условно разделить на девять частей по 3×3 мм, то внутренний сегмент будет лишен пространства для распространения тепла. Именно этот эффект обуславливает наличие зависимости  $R_{th(j-c)}$  от  $A_{chip}$ , как показано на рис. 7.

При использовании подложек с высокой теплопроводностью (например,  $AlN$ ) влияние эффекта «размера чипа» снижается. Чем хуже тепловые свойства керамики, тем более выраженной становится нелинейность зависимости  $R_{th(j-c)}$ . Это также справедливо и по отношению к материалам ТИМ, применяемым при установке силовых модулей на радиатор. Наличие слоя пасты (с теплопроводностью, например,  $= 0,8$  Вт/(м·К) для Wacker P12) создает высокое сопротивление между базовой платой и теплопроводом. Относительная доля  $R_{th(c-s)}$  в общем значении  $R_{th}$  также растет при увеличении толщины (d) слоя пасты и площади кристаллов (рис. 8).

### Тепловая взаимосвязь

Благодаря эффекту распределения тепла сопротивление «кристалл–корпус» снижается на 25% при удвоении площади чипа (100 мкм: 120 мм<sup>2</sup> = 0,235 К/Вт; 60 мм<sup>2</sup> = 0,315 К/Вт), хотя в соответствии с оценочным выраже-

нием для  $R_{th}$  уменьшение должно составить 50%. На рис. 8 показано влияние, оказываемое технологией монтажа (толщина слоя термопасты) на тепловые характеристики силового модуля. По рисунку видно, что существуют физические пределы при использовании чипов большей площади для наращивания мощности. Вследствие этого максимальный размер кристаллов, применяемых в силовых модулях, находится в диапазоне от 30 мм<sup>2</sup> (IMS) до 150 мм<sup>2</sup> ( $Al_2O_3$  DBC). Увеличение мощности достигается за счет параллельного соединения чипов и улучшения распределения тепла.

Стремление к миниатюризации силовых ключей требует от конструкторов внимательного отношения к эффекту взаимного теплового влияния, например при близком расположении кристалла IGBT и его антипараллельного диода. В соответствии с расчетами, нагрев чипов вследствие тепловой связи, например по подложке из  $Al_2O_3$ , может происходить, если расстояние между ними

$$\alpha = 0,6\sqrt{A_{chip}}$$

В примере, показанном на рис. 9, это справедливо для чипов площадью 36 мм<sup>2</sup>, находящихся на расстоянии 3,6 мм. Очевидно,

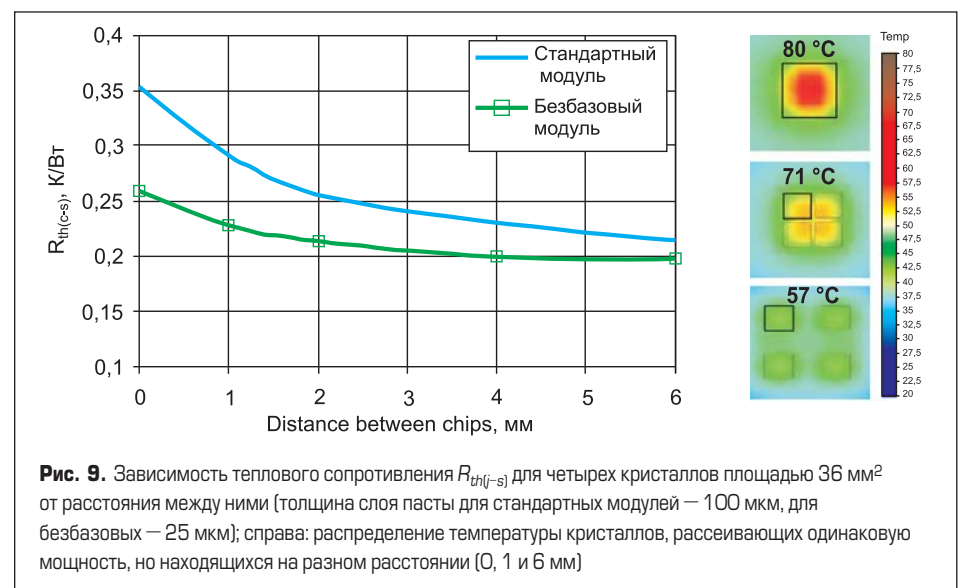
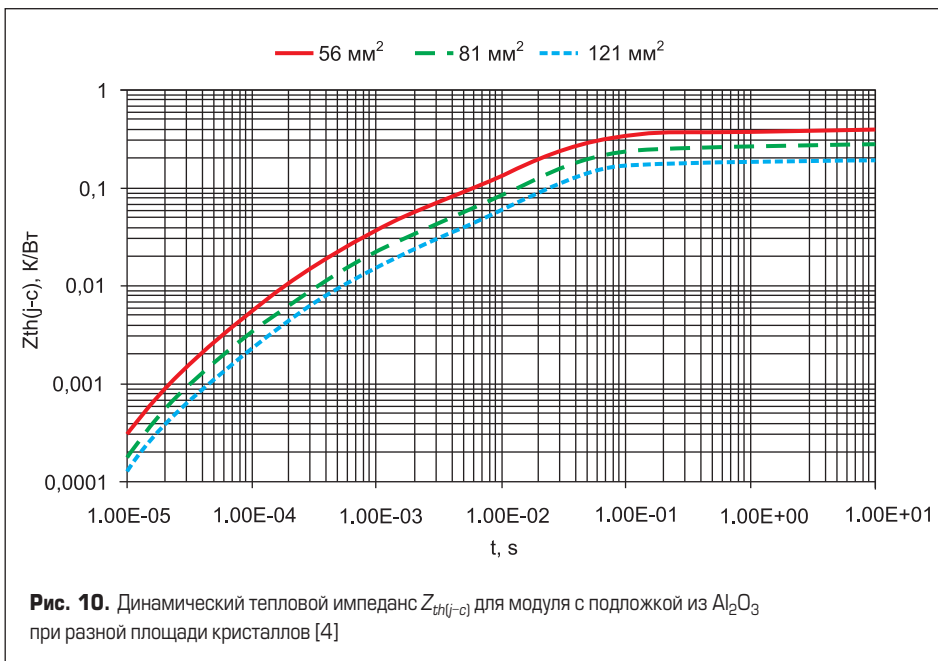


Рис. 9. Зависимость теплового сопротивления  $R_{th(j-s)}$  для четырех кристаллов площадью 36 мм<sup>2</sup> от расстояния между ними (толщина слоя пасты для стандартных модулей — 100 мкм, для безбазовых — 25 мкм); справа: распределение температуры кристаллов, рассеивающих одинаковую мощность, но находящихся на разном расстоянии (0, 1 и 6 мм)



что в каждом конкретном случае величина  $\alpha$  зависит от конструкции модуля и теплопроводности его слоев.

В зависимости от плотности установки чипов тепловое взаимодействие осуществляется:

- по верхнему слою металлизации DBC-подложки (например, кристаллы в модуле с максимальным номинальным током для данного типоразмера);
- по базовой плате (например, кристалл IGBT + антипараллельный диод в стандартном модуле);
- по радиатору.

### Тепловой импеданс

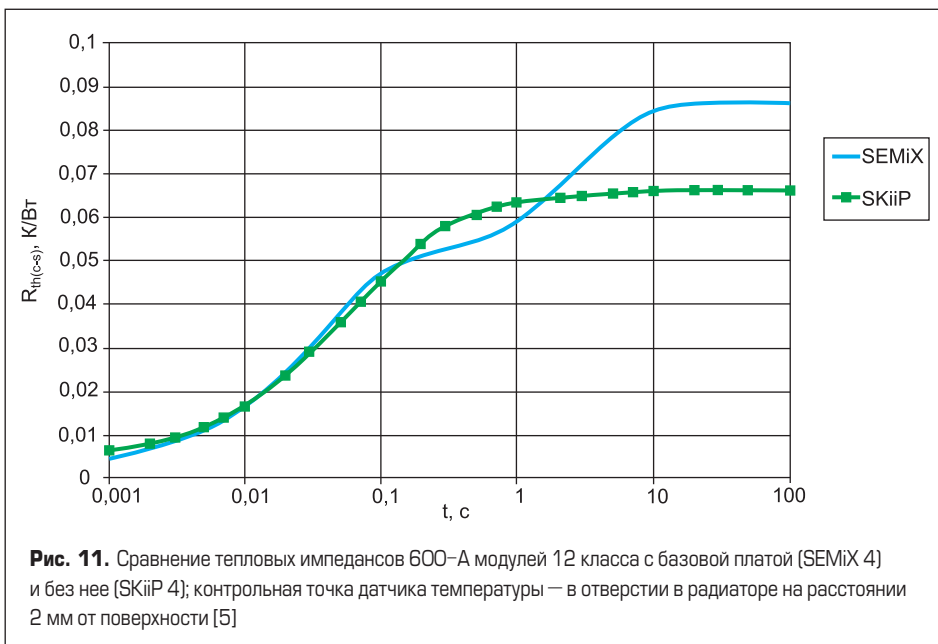
Как было сказано выше, в дополнение к статическому тепловому поведению силовых ключей очень важно рассматривать и переходные процессы, характеризующиеся динамическим тепловым импедансом  $Z_{th}$ .

На рис. 10 показан типовой график зависимости  $Z_{th(j-c)}$  от длительности импульса проводимости для модуля с подложкой из оксида алюминия при различном размере чипов.

По рис. 10 видно, что при заданной структуре модуля кривые  $Z_{th}$  для разных кристаллов сдвинуты относительно друг друга. Таким образом, абсолютная величина теплового сопротивления оказывается пропорциональной площади чипа (без учета постоянной времени экспоненциальной функции). Следовательно, тепловой импеданс для кристаллов разного размера может быть определен с помощью следующего выражения:

$$Z_{th(j-c)2} = Z_{th(j-c)1} \times (R_{th(j-c)2} / R_{th(j-c)1}).$$

Кривые импеданса модулей с базовой платой (SEMiX) и без нее (SKiiP) идентичны до тех пор, пока накопление тепла происходит в самих кристаллах и DBC-подложке (рис. 11),



а при длительности импульса проводимости  $t$  более 100 мс графики  $Z_{th}$  расходятся. Преимущество стандартных модулей проявляется в диапазоне 1–2 с, что объясняется способностью медной базовой платы к аккумуляции тепла. Тепловые характеристики прижимных «безбазовых» ключей предпочтительнее при больших значениях  $t$  благодаря меньшей величине  $R_{th}$ .

### Стойкость к термоциклированию

Термомеханические напряжения, возникающие при работе привода в условиях переменной нагрузки (электротранспорт, лифты), воздействуют на все «жесткие» связи модуля, к которым в первую очередь относятся паяные соединения чипов, изолирующей подложки и базовой платы, сварные контакты алюминиевых выводов чипов и медная металлизация DBC-платы.

Слой с разным КТР испытывают стресс не только в процессе работы, но и при изготовлении модулей, например в процессе пайки. Постоянные термомеханические напряжения постепенно приводят к накоплению усталости и сокращению ресурса силовых ключей. Механизмы отказа и корреляция между параметрами термоциклов и сроком службы широко описаны в литературе [8].

### Токонесущая способность силовых терминалов

Совершенствование IGBT-технологий идет по пути роста номинальных токов кристаллов и плотности мощности ключей. Это привело к тому, что токонесущая способность силовых выводов стандартных промышленных конструктивов модулей подошла к своему пределу. Максимальный ток терминалов ( $I_{(RMS)}$ ) ограничен допустимой температурой перегрева, определяемой потерями мощности на активном сопротивлении  $r_{cc-ee}$ . Как правило, эти потери пренебрежимо малы по сравнению с мощностью, рассеиваемой кристаллами. Например, на паяных выводах стандартного конструктива 62 мм SEMITRANS 3 ( $r_{cc-ee} = 0,5$  мОм) при 400 А рассеивается около 80 Вт:

$$P_t = I_{rms}^2 \times r_{cc-ee} = 80 \text{ Вт.}$$

Токонесущая способность терминалов, подключаемых методом ультразвуковой сварки через алюминиевые проводники и заливаемых компаундом (Ecoporack), ниже, чем у паяных (SEMTRANS), из-за ограниченной площади сечения. Преимуществом этой технологии является более высокая механическая прочность, обусловленная жестким креплением выводов к корпусу. Такие терминалы оказываются более стойкими к вибрационным и ударным воздействиям, они рассчитаны на большие моменты кручения и изгиба.

Угловые паяные выводы имеют прямой контакт с медными шинами DBC-подложки, при этом обеспечивается лучший отвод рассеиваемого ими тепла. Отметим, что данный

технологический процесс достаточно сложен и состоит из нескольких этапов, включающих предварительную формовку и вторичную пайку.

Пружинные соединения [9] отличаются самой высокой стойкостью к механическим и термомеханическим воздействиям. Благодаря образованию квази-герметичных зон в области контакта с печатной платой, они способны с успехом работать в агрессивных промышленных средах. Недостатком пружинных выводов является ограниченная токонесущая способность, поэтому они используются, как правило, для передачи слаботочных контрольных сигналов (SEMiX, SKiiP). Однако в модулях средней мощности (MiniSKiiP) с диапазоном токов 50–150 А пружины применяются и в качестве силовых, для чего они объединяются в группы (максимальная нагрузка на один контакт составляет 20 А).

Прижимные соединения большой площади, используемые, например, в дисковых корпусах, считаются почти идеальными, поскольку у них отсутствует эффект накопления усталости при воздействии термомеханических напряжений. Они обеспечивают хорошую электрическую и тепловую связь благодаря большому количеству точек реальной проводимости. Однако для реализации преимуществ таких соединений конструкция их подключения должна быть рассчитана на очень высокое усилие прижима, действующее в течение всего срока службы изделия.

### Литература

1. Arendt Wintrich, Ulrich Nicolai, Werner Tursky, Tobias Reimann. Application Notes for IGBT and MOSFET modules. SEMIKRON International, 2010.

2. Mitsubishi IGBT manual. 2009. [www.mitsubishichips.com/Global/files/manuals/igbt\\_note\\_e.pdf](http://www.mitsubishichips.com/Global/files/manuals/igbt_note_e.pdf)
3. Murata A., Tabata M. 2500 A/1200 V Dual IGBT Module // PCIM Europe. Conf. Proc. 2009.
4. Konrad S. Ein Beitrag zur Auslegung und Integriation spannungsgespeister IGBT-Wechselrichter. Diss. TU Ilmenau 1997, ISLE Verlag, ISBN 3-932633-09-1.
5. Колпаков А. Контрольная точка // Электронные компоненты. 2005. № 6.
6. Schultz-Harder J. Liquid cooling in high density packages. [www.curamik.com](http://www.curamik.com).
7. Freyberg M., Scheuermann U. Measuring Thermal Resistance of Power Modules // PCIM Europe journal. 2003.
8. Колпаков А. Термоциклы и термоциклирование // Силовая электроника. 2006. № 2.
9. Колпаков А. Надежность прижимных соединений силовых модулей // Силовая электроника. 2006. № 4.