

# Оптимизация характеристик силовых модулей

## для сложных условий эксплуатации

При разработке специализированных силовых модулей для транспортных средств с электрическим и гибридным приводом (автомобилей, грузовиков, автобусов) необходимо применять уникальные технологии и инновационные конструкторские решения. Противоречивые требования увеличения плотности мощности, расширения температурного диапазона и, в то же время, повышения надежности и снижения габаритов не могут быть удовлетворены только за счет правильного выбора полупроводниковых компонентов. Для создания силового модуля, отвечающего современным запросам рынка, нужны как оптимизация тепловых и электрических характеристик, так и использование принципиально новых подходов к способам проектирования. Примером удачного решения, соответствующего практически всем указанным требованиям, стала новая серия модулей SKiM 63/93 [1–5], разработанных компанией SEMIKRON специально для применения на электротранспорте. В предлагаемой вниманию читателей статье обсуждаются основные концепции и технологические приемы, используемые при разработке силовых ключей для предельно тяжелых условий эксплуатации.

Андрей Колпаков

andrey.kolpakov@semikron.com

Семейство силовых ключей SKiM (Semikron Integrated Module) представляет собой новое поколение компактных модулей прижимного типа без базовой платы (pressure-contact baseless module). В отличие от наиболее распространенных стандартных силовых ключей с массивным медным (или композитным) основанием, соединенным с керамической изолирующей DBC-подложкой с помощью пайки, в модулях прижимного типа DBC-керамика имеет прямой контакт с теплоотводом. Специальная прижимная пластина создает давление на подложку в зонах наибольшего локального тепловыделения. Прижимная конструкция обеспечивает равномерную передачу тепла на радиатор и исключает возникновение так называемого биметаллического эффекта (имеется в виду взаимный изгиб жестко связанных слоев меди и керамики, имеющих различные коэффициенты теплового расширения — КТР).

Отсутствие базовой платы дает возможность во много раз повысить стойкость силовых ключей к термоциклированию и устранить основную причину отказов мощных модулей — разрушение паяного соединения керамики и меди, вызванное термомеханическим напряжением из-за разности КТР. На рис. 1 показан внешний вид модуля SKiM и основные элементы его прижимной конструкции, которая достаточно подробно рассмотрена в [1–5].

Модули SKiM содержат три независимых полумостовых каскада, каждый из которых имеет свои DC- и AC-терминалы, и датчик температуры с NTC-характеристикой. Для подключения платы управления к сигнальным выводам IGBT и термодатчику используются пружинные контакты, надежность которых подтверждена специальными испытаниями и многолетним опытом эксплуатации [8]. Подобный способ соединения силового модуля и драйвера повышает стойкость конструкции к механическим воздействиям и термоциклированию. Кроме того, поскольку окончания пружин подключаются к достаточно большим контактным площадкам на печатной плате, не требуется их точного позиционирования, что существенно упрощает как ручную, так и автоматизированную сборку.

Компоненты серии SKiM предназначены для применения в приводах мощностью от 30 до 150 кВт в зависимости от условий эксплуатации и способа охлаждения. Основные характеристики модулей SKiM 63/93 в инверторном применении и соответствующие рабочие режимы приведены в таблице 1.

Один из самых интересных элементов конструкции SKiM — это копланарная шина постоянного



Рис. 1. Внешний вид модуля SKiM63, особенности прижимной конструкции

**Таблица 1.** Основные характеристики модулей SKiM 63/93

Параметр, ед. измерения	SKiM 63	SKiM 93
$R_{thj_c,IGBT}$ C/Вт	0,14	0,095
$R_{thj_c,Dr}$ C/Вт	0,27	0,18
$I_{C,ном1}$ A (600 В)	600	900
$I_{C,ном2}$ A (1200 В)	300	450
$I_{RMS1}$ A (600 В) <sup>1</sup>	280	410
$I_{RMS2}$ A (1200 В) <sup>2</sup>	165	250

Примечание:

<sup>1</sup> При  $U_{DC} = 400$  В,  $U_N = 230$  В,  $\cos\phi = 0,8$ ;  $f_{sw} = 10$  кГц,  $T_{max} = 150$  °С,  $T_a = 80$  °С,  $R_{th,coolcr} = 8/12$  °С/кВт (SKiM 63/93)

<sup>2</sup> При  $U_{DC} = 750$  В,  $U_N = 400$  В,  $\cos\phi = 0,8$ ;  $f_{sw} = 8$  кГц,  $T_{max} = 150$  °С,  $T_a = 80$  °С,  $R_{th,coolcr} = 8/12$  °С/кВт (SKiM 63/93)

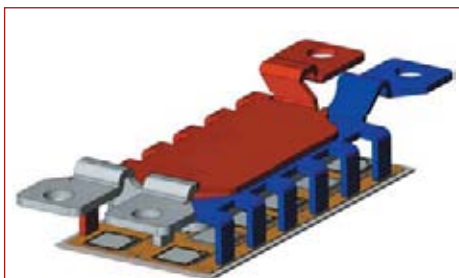
тока, внешний вид которой вместе с DBC-платой показан на рис. 1б и 2. Ее разработка осуществлялась на основе следующих требований:

- низкая распределенная индуктивность и активное сопротивление;
- симметричное и равномерное распределение токов между параллельно соединенными чипами (IGBT, антипараллельные диоды);
- максимально возможная плотность мощности;
- возможность дополнительного отвода тепла от DBC-платы.

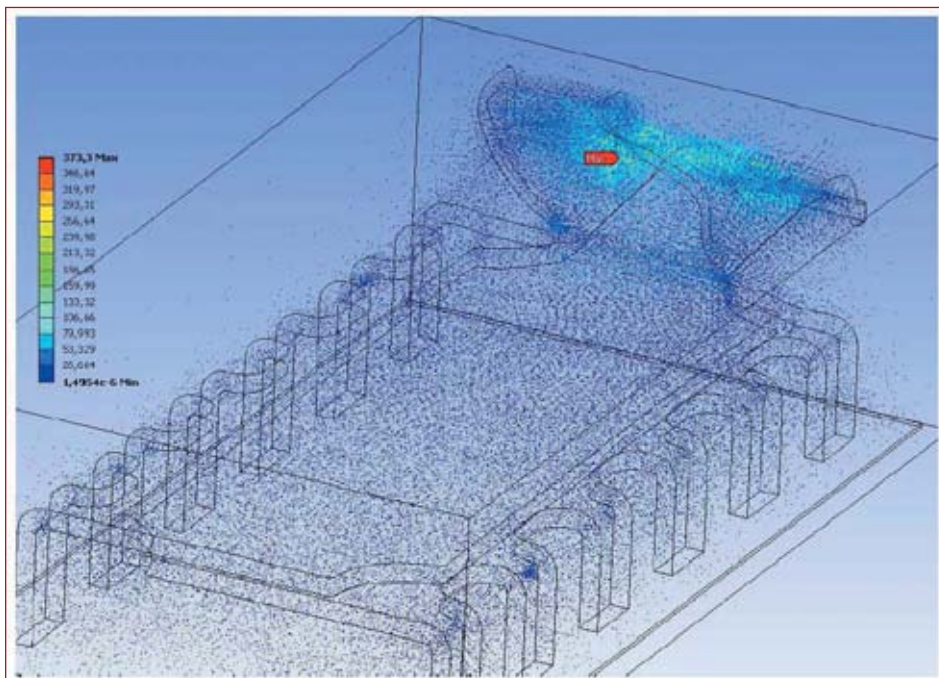
### Оптимизация конструкции

Слои силовой шины SKiM сделаны из штампованных медных листов, собираемых в плоско-параллельный «сэндвич». Каждая из пластин звена постоянного тока имеет на краях Г-образные окончания, необходимые для подключения к омедненным контактным площадкам DBC-платы (рис. 2). Полученная сборка напрессовывается на керамику, таким образом обеспечивается многоточечный доступ к чипам, позволяющий симметрично распределить ток. Прижимная армированная пластина в корпусе модуля создает равномерное прижимающее усилие, необходимое для получения минимального переходного сопротивления в зонах контакта.

Копланарное (плоско-параллельное) расположение слоев положительного и отрицательного терминалов в сочетании с индивидуальным доступом к каждому чипу позволяет получить предельно низкий уровень суммарной распределенной индуктивности  $L_{CE}$ . Значение  $L_{CE}$  измеренное между крепежными отверстиями DC- и AC-выводов SKiM, не превышает 10 нГн, а между DC-терминалами — 20 нГн.



**Рис. 2.** Копланарная DC-шина с многоточечным доступом к DBC-подложке



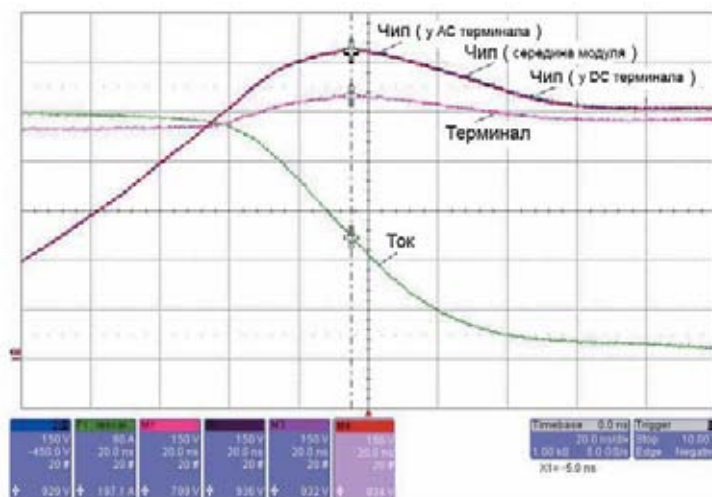
**Рис. 3.** Моделирование распределения напряженности магнитного поля и индуктивности DC-шины

Моделирование распределения напряженности магнитного поля, проведенное методом конечных элементов (FEM — Finite Element Method), показывает, что основная часть индуктивности шины образуется за счет токовой петли между выводами  $\pm DC$  в зоне, где невозможно обеспечить их копланарное расположение (красная стрелка на рис. 3). Проведенная с помощью моделирования оптимизация звена постоянного тока и многоточечный доступ к выводам чипов позволили снизить суммарное значение  $L_{CE}$  примерно на 30% ( $-10$  нГн).

Преимущества силовых ключей с малым уровнем паразитной индуктивности очевидны: снижение  $L_{CE}$  приводит к уменьшению выбросов напряжения при выключении, пропорциональных величине индуктивности и скорости спада тока  $\Delta V = di/dt \times L_{CE}$ . Модули, имеющие малую паразитную индуктивность, обладают более высокой стойкостью к динамическим нагрузкам, включая режим корот-

кого замыкания (КЗ) и мгновенного выключения тока КЗ.

При параллельном соединении чипов IGBT очень важно обеспечить идентичность их работы в статических и динамических режимах и минимизировать уровень осцилляций при переключении. Для максимального использования блокирующего напряжения необходимо свести к минимуму разницу переходных перенапряжений, возникающих на параллельно соединенных кристаллах. На рис. 4 показано распределение напряжений «коллектор–эмиттер»  $V_{CE}$  возникающих на чипах, расположенных в различных точках модуля: в его центре, рядом с AC- и DC-выводом. При выключении IGBT (ток  $I_C = 400$  А, напряжение DC-шины  $V_{CC} = 700$  В) со скоростью  $di/dt = 6600$  А/мкс, разброс пиковых значений  $V_{CE}$  находится в диапазоне от 929 до 936 В. Столь низкая разница говорит о корректно выбранной топологии соединений и идентичности импедансов параллельных токовых цепей.



**Рис. 4.** Напряжение при выключении IGBT на DC-терминалах и параллельных чипах IGBT

Постоянное совершенствование технологий силовых полупроводников, появление новых поколений IGBT сопровождается непрерывным увеличением плотности мощности и снижением уровня статических и динамических потерь. Номинальный ток кристаллов IGBT ( $I_{Cnom}$  — параметр, нормируемый производителем чипов), примененных в модулях SKiM 93 с рабочим напряжением 600 В, составляет 900 А. Очевидно, что предельные характеристики силового модуля ограничены свойствами конструктива, возможностями системы охлаждения, допустимой токовой нагрузкой на терминалы. Дизайн звена постоянного тока SKiM, использование пакета широких и тонких медных пластин позволяют практически полностью реализовать мощностные возможности чипов. Сопротивление медных слоев не превышает 60 мкОм, а суммарный импеданс DC-шины  $r_{cc-ee}$ , включающий контактные переходные сопротивления, составляет около 0,3 мОм. Для сравнения укажем, что у стандартного модуля IGBT (типоразмер 62 мм)  $r_{cc-ee} = 1,2$  мОм.

В инверторных схемах токовая нагрузка на вывод AC примерно в 2 раза выше, чем у DC-терминалов. Для улучшения отвода тепла слой AC в «сэндвиче» шины звена постоянного тока занимает нижнее положение. При температуре теплоотвода 70 °C допустимый ток силовой шины SKiM составляет 600 А для AC-и 425 А для DC-слоев, при этом температура терминалов в зоне их подключения к внешним цепям не превышает 115 °C. Благодаря прямому многоточечному доступу к контактным поверхностям DBC-керамики удается эффективно отводить на радиатор тепло, выделяемое элементами шины.

Инверторы на основе модулей SKiM способны работать в приводах мощностью до 150 кВт с достаточно большим запасом по тепловым режимам. Сказанное, конечно, справедливо при условии корректного теплового расчета и правильного выбора способа отвода тепла.

При увеличении тока возрастают потери и тепловыделение полупроводниковых кристаллов, что в свою очередь также увеличивает перегрев терминалов. Для исследования тепловых режимов работы элементов шины с учетом мощности, рассеиваемой чипами, было проведено моделирование, результаты которого представлены на рис. 5. Анализ показал, что при максимальной токовой нагрузке наиболее нагретой областью DC-вывода является изгиб в области внешнего подключения.

**Топология соединений**

Топология соединений DBC-подложки и положение на ней кристаллов IGBT и диодов оказывает значительное воздействие на динамические характеристики и тепловое сопротивление силовых модулей. Очевидно, что поведение ключевых элементов в первую очередь определяется их собственными свойствами, однако следует отметить, что, например, падение напряжения на паразитных индуктивностях линий связи влияет на скорость переключения и приводит к появлению паразитных осцилляций между параллельными чи-

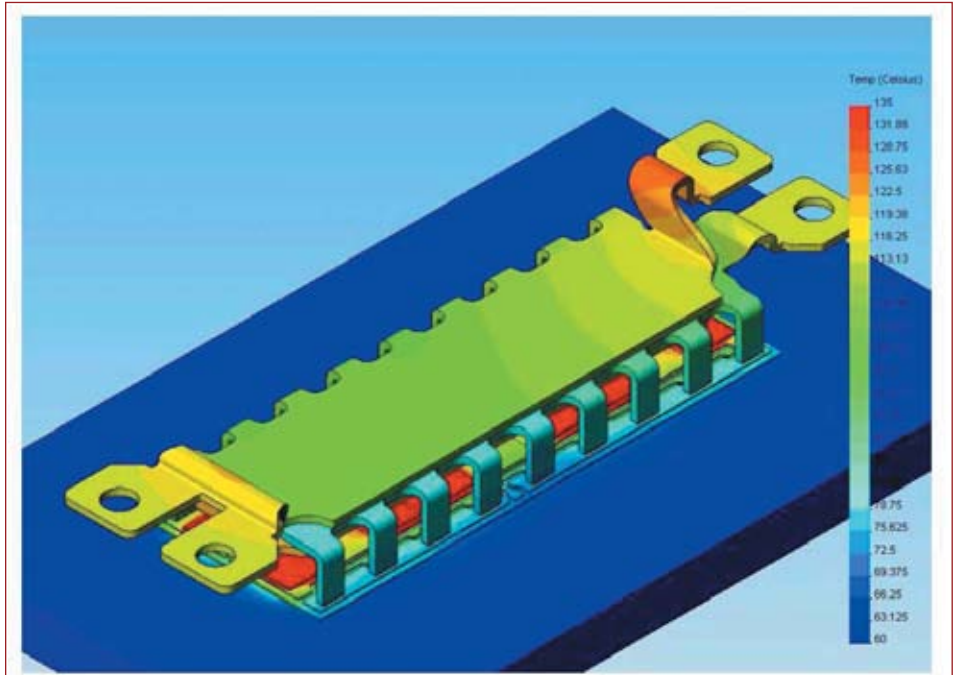


Рис. 5. Распределение температуры DC-шины при выходном токе  $I_{AC} = 600$  A<sub>RMS</sub>

пами, даже при полной идентичности их параметров.

Чтобы достичь максимальной «синхронности» процесса коммутации и подавить паразитные колебания, параллельные цепи должны иметь предельно низкую и одинаковую индуктивность. Решающее значение для преодоления данной проблемы имеет конфигурация соединительных шин на DBC-плате. На рис. 6а, б показаны пути прохождения тока между чипами IGBT (2 в параллель) и диодов верхнего и нижнего плеча: такая топология, реализованная в модулях SKiM, обеспечивает кратчайший и одинаковый путь тока в обоих случаях.

На эпохах, представленных на рис. 7, показан процесс выключения модуля SKiM 63 при напряжении DC-шины 900 В и токе коллектора 600 А. Динамические потери, уровни пере-напряжения и скорость изменения тока di/dt для транзисторов верхнего и нижнего плеча практически идентичны. Амплитуды выбросов напряжения при выключении отличаются не более, чем на 15 В (≈ 1,3%), что говорит о хорошем согласовании цепей переключения каскадов TOP и BOT.

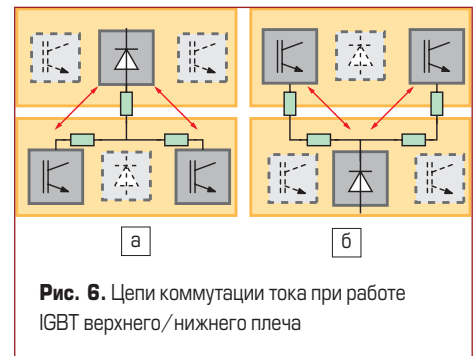


Рис. 6. Цепи коммутации тока при работе IGBT верхнего/нижнего плеча

Для выравнивания динамических потерь у параллельно соединенных кристаллов IGBT должно быть обеспечено симметрирование токов в коммутационных режимах. Разброс параметров самих полупроводников приводит к разнице потерь переключения, не превышающей 10%. Это различие может многократно увеличиться при неудачной топологии соединений, отсутствии согласования токонесящих цепей. При разработке и оптимизации схемы коммутации необходимо учитывать два основных фактора, влияющих на данный про-

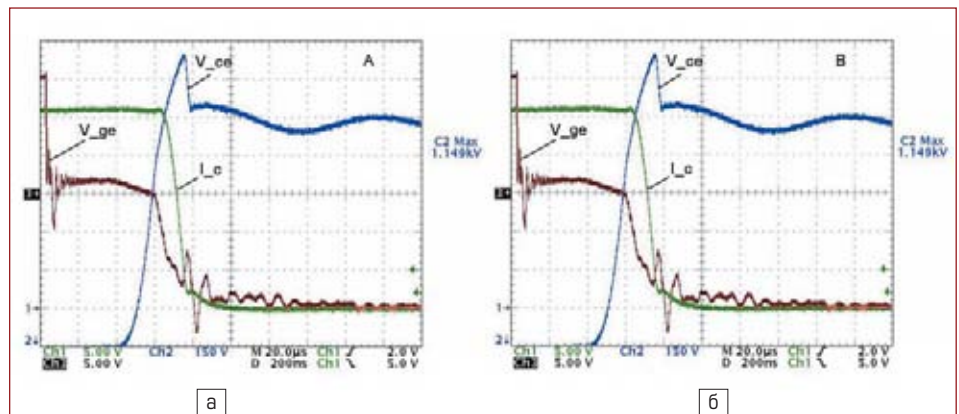


Рис. 7. а) Эпохи выключения IGBT нижнего плеча (BOT); б) эпохи выключения IGBT верхнего плеча (TOP): ток  $I_C$  (600 А), напряжение «коллектор-эмиттер»  $V_{CE}$ , напряжение «затвор-эмиттер»  $V_{GE}$  при  $V_{DC} = 900$  В,  $t = 125$  °C

цесс: наличие паразитных индуктивностей в линии протекания тока между (+) и (-) терминалами DC-шины, а также смещение напряжения в цепях управления затвором, вызванное протеканием тока силового каскада.

Для решения первой проблемы необходимо свести к физическому минимуму индуктивность шины звена постоянного тока. Как было показано ранее, этого можно достичь при использовании копланарной DC-шины, имеющей минимальную площадь так называемой «токовой петли». На рис. 8а показана упрощенная эквивалентная схема полумостового каскада, включающая паразитные индуктивности, расположенные по пути коммутации силовых токов. На рисунке видно, что наименьшая из них находится в коллекторе IGBT, расположенном ближе всего к DC-терминалу ключа, а максимальная — в коллекторе наиболее удаленного от терминала ключа. Однако если шина спроектирована корректно (то есть имеет структуру «сэндвича»), то магнитное поле по длине шины (при протекании тока от DC+ к DC-) меняется незначительно. Индуктивности, выделенные голубым цветом, являются свя-

занными, и их влиянием можно пренебречь, в результате чего схема приобретает более простой вид (рис. 8б). Обратите внимание на то, что в этом случае величины эквивалентных паразитных индуктивностей оказываются одинаковыми для всех чипов IGBT. Благодаря этому удастся минимизировать разницу уровней импульсных перенапряжений, возникающих при выключении параллельно соединенных транзисторов, что и подтверждают соответствующие измерения (рис. 7).

В решении второй из упомянутых проблем поможет эквивалентная схема (рис. 8в), на которой показаны пути токов, создающих смещение затворного напряжения  $V_{GE}$ . При коммутации необходимо обеспечить одинаковость и одновременность подачи управляющих сигналов на затворы параллельно соединенных IGBT. Напряжения, наведенные на паразитных индуктивностях дорожек DBC-платы, компенсируют друг друга, поскольку находятся в противофазе (перечеркнутые зеленые стрелки на рис. 8в). Тем не менее, сигнал управления затвором  $V_{GE}$  транзистора T2 снижается за счет инверсного напряжения, образующегося на рас-

пределенной индуктивности выводов чипа, однако это снижение невелико и одинаково для всех параллельных чипов (красная и зеленая стрелки на рис. 8в). Испытания показывают, что при правильно выбранной топологии соединений удастся достичь практически полной симметрии токов во всех динамических режимах, включая короткое замыкание и последующее отключение.

### Тепловое сопротивление

Уменьшение уровня потерь и расширение температурного диапазона новых поколений полупроводников позволили существенно повысить плотность тока силовых модулей. Мощностные характеристики кристаллов ограничены возможностями отвода тепла, что в свою очередь непосредственно связано с их размерами.

Тепловое сопротивление является функцией активной площади чипа и во многом зависит от расстояния между параллельно работающими кристаллами (рис. 9). Кристаллы больших размеров имеют больший градиент температуры по поверхности, от них сложнее отвести тепло. Тепловые характеристики улучшаются при использовании параллельного соединения некоторого количества небольших чипов, разнесенных по поверхности изолирующей подложки. При одинаковой суммарной эффективной площади кремния тепловое сопротивление оказывается существенно ниже, а взаимный нагрев кристаллов практически отсутствует при расстоянии между ними 3 мм и более.

Процесс распространения тепла и перегрев в различных зонах силового модуля показан на рис. 9. Наибольшая температура наблюдается в центре чипа, она спадает к его краям в соответствии с графиком, приведенным на рис. 9б. Этот эффект особенно ярко выражен при увеличении площади кремния: чем она больше, тем выше градиент температуры между его центральной и крайними областями. Таким образом, при циклическом изменении мощности нагрузки сам кристалл подвергается термомеханическому стрессу, что неизбежно сокращает срок его службы и влияет на надежность паяного слоя. Единственный способ снижения уровня термомеханического напряжения при одновременном уменьшении теплового сопротивления «кристалл-подложка» — это замена крупного кристалла на параллельное соединение чипов меньшей площади.

На рис. 9в представлены результаты теплового моделирования трех вариантов конструкции силового модуля без базовой платы (технология SKiiP) с общей площадью кремния 144 мм<sup>2</sup>: 1 большой кристалл 12 × 12 мм и 4 параллельных кристалла 6 × 6 мм с различным взаимным расположением. Для всех трех случаев температура теплостока составляет 20 °C, а плотность мощности — 2 Вт/мм<sup>2</sup>.

Графики, показанные на рис. 10, демонстрируют снижение температуры чипов при изменении расстояния между ними. Приведенные результаты справедливы как для модулей прижимной конструкции, так и для стандартных компонентов. Температура полупровод-

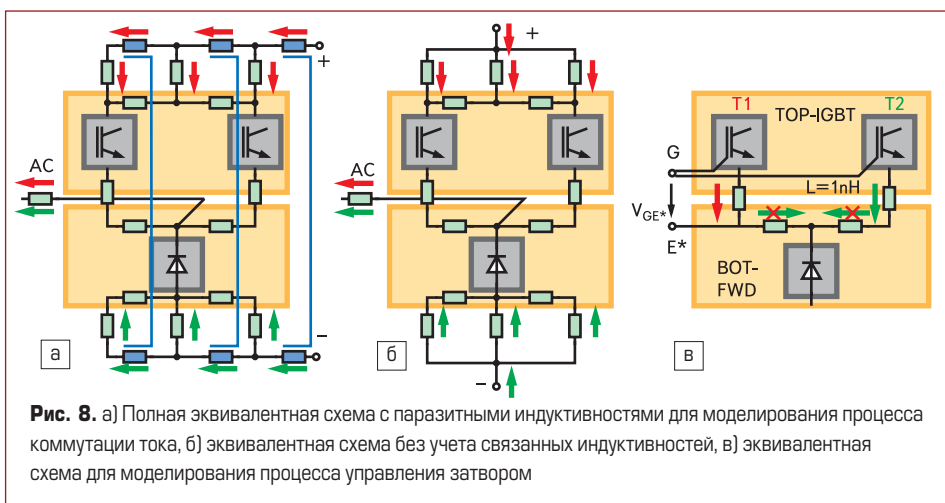


Рис. 8. а) Полная эквивалентная схема с паразитными индуктивностями для моделирования процесса коммутации тока, б) эквивалентная схема без учета связанных индуктивностей, в) эквивалентная схема для моделирования процесса управления затвором

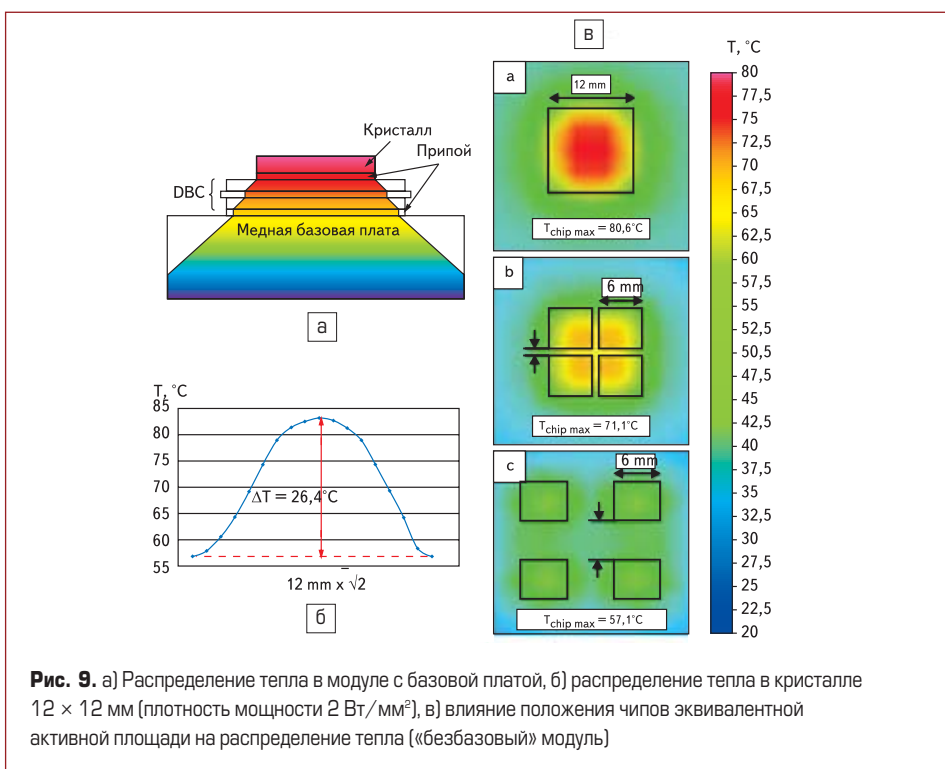


Рис. 9. а) Распределение тепла в модуле с базовой платой, б) распределение тепла в кристалле 12 × 12 мм (плотность мощности 2 Вт/мм<sup>2</sup>), в) влияние положения чипов эквивалентной активной площади на распределение тепла («безбазовый» модуль)

ников в модулях с базовой платой при прочих равных условиях оказывается выше, чем в силовых ключах прижимного типа, что показывают синяя и красная эпюры. На первый взгляд это может показаться странным, ведь массивная базовая плата способствует лучшему распределению тепла в основании модуля. Разница объясняется наличием так называемого «биметаллического эффекта», обусловленного жестким соединением основания стандартного модуля с радиатором. Крепление на теплоотвод осуществляется на краях базовой платы, при возникновении термомеханических напряжений это приводит к нарушению ее плоскостности, к изгибам за счет теплового расширения. Чтобы при этом исключить возникновение пустот в слое теплопроводящей пасты, наносимой на радиатор, толщина слоя должна быть не менее 50 мкм. Типовое значение толщины слоя для стандартных модулей с базовой платой, обусловленное неоднородностью поверхности и возможностью биметаллического эффекта, находится в пределах 80–100 мкм.

Следует отметить, что при использовании нескольких параллельных кристаллов теряется некоторая часть их активной площади из-за появления дополнительных краевых областей. Результатом уменьшения размера активной поверхности является повышение уровня потерь при том же токе. При проектировании модулей SKiM, в которых использованы чипы площадью 60 и 80 мм<sup>2</sup> при расстоянии 3 мм, был найден удачный компромисс между тепловым сопротивлением и потерями. Прижимная плата, обеспечивающая давление на поверхность DBC-платы в местах установки IGBT и диодов, предотвращает возможность изгиба и потери теплового контакта охлаждаемой поверхности модуля. Это позволяет использовать слой теплопроводящей пасты толщиной всего 20–30 мкм.

Кроме того, вместо пайки для установки чипов на керамическую плату в модулях SKiM используется так называемая низкотемпературная технология спекания порошкового серебра (Low Temperature Sintering Technology). Спеченный серебряный слой отличается гораздо более высокой теплопроводностью и эластичностью, в результате чего уменьшается уровень термомеханических стрессов, действующих на чипы при циклической нагрузке.

Часть тепла из зон установки кристаллов отводится через массивные и широкие слои силовой шины, благодаря чему суммарное значение теплового сопротивления удалось снизить еще на 5–10%.

### Тепловая защита

Для измерения температуры силовых модулей и их защиты от перегрева применяются различные виды датчиков, наиболее распространенные из которых — терморезисторы с отрицательным (NTC) и положительным (PTC) температурным коэффициентом.

Термодатчик устанавливается на керамическую подложку модуля рядом с силовыми кристаллами. Благодаря высокой теплопроводности материалов керамики (оксида и нитрида алюминия), температура подложки и радиатора практически совпадает.

Надежность работы схемы защиты от перегрева во многом зависит от положения сенсора внутри силового модуля. Место измерения температуры играет особенно важную роль в случае, когда пороговое значение задается встроеной схемой управления. Для определения оптимального положения термодатчика были проведены специальные исследования; соответствующая тепловая модель DBC-платы модуля SKiM 6 показана на рис. 11 (в данном случае анализируется режим воздушного охлаждения).

Как было указано ранее, модули SKiM не имеют базовой платы, их керамическая DBC-подложка устанавливается непосредственно на радиатор. Уровень тепловой связи силовых чипов и датчика меняется в зависимости от его положения, при анализе рассматривались следующие варианты: А (сенсор непосредственно на кристалле IGBT), В и С (сенсор в различных точках DBC-платы), D (сенсор на поверхности радиатора). Для каждого варианта установки тепловое сопротивление «кристалл–датчик»  $R_{th(j-r)}$  (именно этот параметр указывается в документации «безбазовых» силовых ключей) имеет различное значение.

В состоянии теплового равновесия безопасный уровень срабатывания схемы защиты от перегрева может быть однозначно определен для любого из рассматриваемых вариантов. Если, например, температура кристалла

$T_j$  не должна превышать 140 °С, то отключение силовых транзисторов следует производить при температуре датчика 120 °С (вариант А), 110 °С (вариант В), 100 °С (вариант С) и 70 °С (вариант D).

Чем выше уровень тепловой связи между источником тепла и сенсором, тем ниже время реакции и меньше влияние системы охлаждения на процесс мониторинга температуры, именно поэтому использование интегрированных термодатчиков всегда предпочтительнее. В то же время при изменении любого параметра системы охлаждения (материал и толщина основания радиатора, температура охлаждающей среды, толщина слоя теплопроводящей пасты и т. д.) приходится корректировать и пороговое значение температуры отключения. Это затрудняет правильный выбор и настройку интегрированной тепловой защиты в интеллектуальных силовых модулях. С данной точки зрения наиболее предпочтительным является использование датчика температуры для мониторинга и формирования соответствующего аналогового сигнала. Порог срабатывания схемы защиты в этом случае должен задаваться внешним контроллером в зависимости от режима работы силового модуля и способа его охлаждения.

При хорошей тепловой связи между источником тепла (силовыми кристаллами) и датчиком снижается влияние системы охлаждения и соответственно упрощается настройка схемы термозащиты. При этом также упрощается организация защиты в динамических режимах при кратковременных перегрузках.

Для того чтобы продемонстрировать влияние системы охлаждения на состояние тепловой системы, толщина слоя теплопроводящей пасты была увеличена с 50 до 100 мкм. Соответствующее изменение теплового сопротивления для различных вариантов установки датчика показано на рис. 12.

Сенсор А имеет наилучшую тепловую связь с чипом, следовательно, для этого случая значение теплового сопротивления «кристалл–датчик»  $R_{th(j-r)}$  должно быть наиболее стабильным. Действительно, его увеличение составило всего 3%, в то время как для вариантов В и С наблюдался рост  $R_{th(j-r)}$  на 7–8%. Для случая D, при котором тепловое сопротивление более всего зависит от параметров системы охлаждения, увеличение  $R_{th}$  превысило 25%.

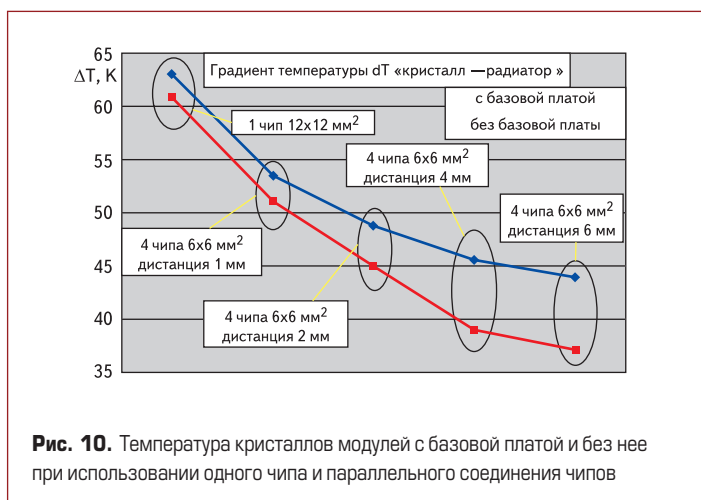


Рис. 10. Температура кристаллов модулей с базовой платой и без нее при использовании одного чипа и параллельного соединения чипов

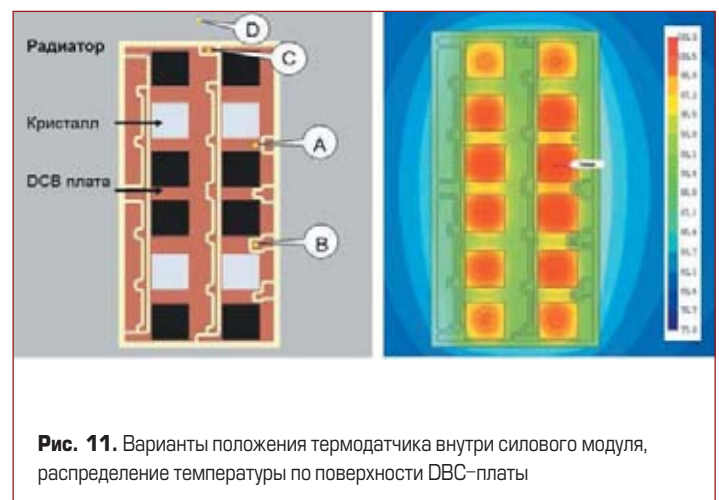
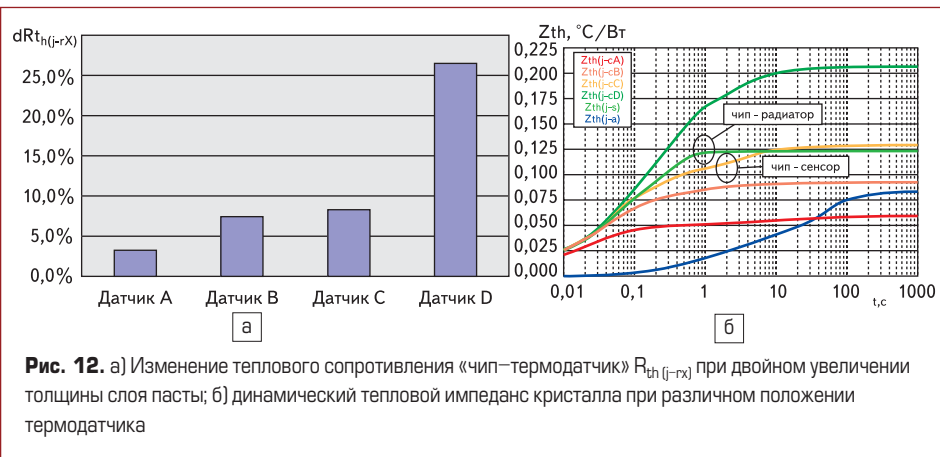


Рис. 11. Варианты положения термодатчика внутри силового модуля, распределение температуры по поверхности DBC-платы



**Рис. 12.** а) Изменение теплового сопротивления «чип–термодатчик»  $R_{th(j-r)}$  при двойном увеличении толщины слоя пасты; б) динамический тепловой импеданс кристалла при различном положении термодатчика

Основным вопросом, который необходимо рассмотреть в данной связи, является возможность использования термодатчика для защиты силовых чипов от перегрева при быстром изменении температуры. Каждый вариант установки датчика характеризуется специфической реакцией тепловой системы, которую лучше всего описывать с помощью графиков динамического теплового импеданса  $Z_{th}$  (рис. 12). Сравнение эшор  $Z_{th(j-r)}$  для разных вариантов размещения сенсора показывает, что тепловая пара «чип–радиатор» достигает установившегося состояния примерно за 1 с, в то время как системе «чип–датчик» требуется до 100 с. Причиной этого является высокая теплоемкость радиатора и медленное распределение тепла в его объеме (измерение температуры радиатора производится в его теле непосредственно под чипом).

Для каждого типа силового полупроводника определяется величина мощности  $P_{tot}$ , которую он может рассеять в установившемся состоянии. При изменении мощности рассеяния (например, с 50% до 200%  $P_{tot}$ ) температура чипа будет повышаться с определенной постоянной времени. Датчик А зафиксирует заданный порог (120 °C) через 0,19 с, обеспечивая надежную тепловую защиту, а температура кристаллов ни при каких условиях не превысит предельного значения 150 °C.

При той же пороговой величине, определенной сенсорами В и С, перегрев чипов может достигнуть критических величин 160 °C и 170 °C, поскольку тепловая константа для этих случаев возрастает до 0,3 и 0,4 с соответственно. Задержка при использовании варианта D будет уже более 1 с, следовательно, он менее всего пригоден для защиты силовых ключей от перегрева. Таким образом, для устройств, работающих с большими коэффициентами перегрузки и при низких начальных температурах, использование стандартных

термосенсоров в схемах защиты от перегрева не может полностью гарантировать предотвращения перегрева кристаллов.

Анализ основных особенностей тепловых систем, отличающихся различным положением датчика температуры, приведен в таблице 2. Наиболее предпочтительным считается вариант В, обеспечивающий сравнительно небольшое время реакции и гальваническую изоляцию.

Надежная защита от кратковременных тепловых перегрузок — сложная задача. Ее невозможно решить путем ограничения тока, поскольку кратковременные токовые перегрузки в пределах области безопасной работы допустимы. В то же время работа при высоких значениях тока неизбежно ведет к повышению температуры полупроводниковых чипов. Как было показано ранее, высокое время реакции термодатчиков не позволяет организовать абсолютно безопасную защиту от перегрева.

Решение проблемы — в одновременном использовании сигналов токовых и тепловых сенсоров и организации защиты по определенному алгоритму, исключающему критические перегрузки, как по току, так и по теплу. Такую возможность предоставляют IPM высокой степени интеграции, к которым относятся модули SKiIP, имеющие широкие возможности мониторинга режимов. Управляющий контроллер может вычислять реальную температуру чипа  $T_j$  на основании сигналов, получаемых с датчиков, и анализа рабочих режимов схемы. Зависимость  $T_j$  от времени  $t_p$  определяется в соответствии с выражением:

$$T_j(t_p) = T_r + P_o \times R_{th(j-r)} + (P_{over} - P_o) \times Z_{th(j-r)} @ t_p,$$

где  $P_o$  — мощность рассеивания при  $t = 0$ ;  $P_{over}$  — мощность рассеивания в режиме пере-

грузки;  $Z_{th(j-r)}$  — динамический тепловой импеданс (его зависимость от  $t_p$  всегда приводится в технических характеристиках);  $T_r$  — температура датчика (доступна в виде аналогового сигнала на разьеме X1 модуля SKiIP).

### Технология корпусирования и надежность

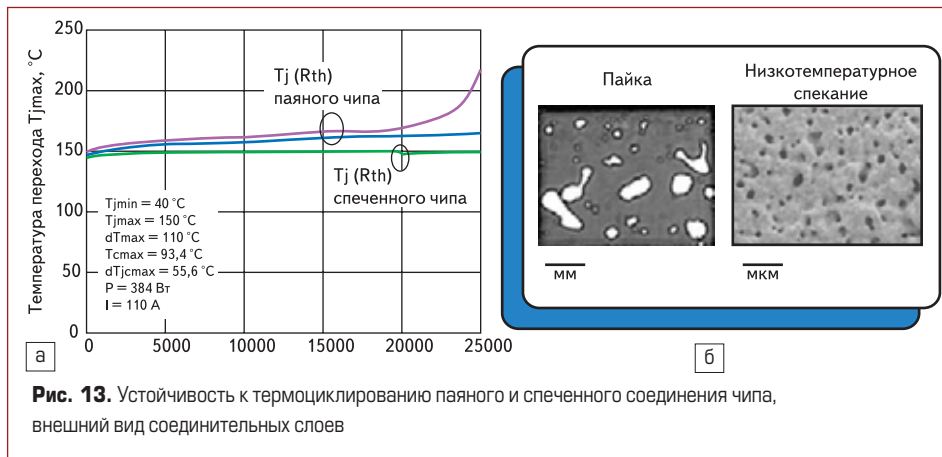
Высокие требования по устойчивости к термоциклированию, характерные для транспортных применений, затрудняют использование традиционных конструкций силовых ключей с медной базовой платой. Различие коэффициентов теплового расширения (КТР, или СТЕ — Coefficient of Thermal Expansion) приводит к высоким термомеханическим напряжениям, разрушающим соединения конструктивных элементов. В первую очередь эта проблема касается паяного слоя большой площади между медным основанием модуля и керамической DBC-платой. Одним из возможных вариантов преодоления проблемы является замена меди на композитный материал (например AlSiC), хорошо согласованный с керамикой по КТР. Однако это решение нельзя признать оптимальным из-за высокой стоимости и худшей теплопроводности композитов. Кроме того, применение AlSiC в качестве базовой платы позволяет повысить только устойчивость силовых ключей к воздействию пассивных термоциклов, то есть изменений температуры окружающей среды.

Компания SEMIKRON рассматривает использование собственной прижимной технологии SKiIP, исключающей применение базовой платы, в качестве оптимального решения проблемы повышения стойкости как к пассивным, так и активным термоциклам. Именно поэтому «безбазовая» структура была использована при проектировании серии модулей SKiM. Достоинством прижимной конструкции является также низкое значение теплового сопротивления и равномерная передача тепла на радиатор, которая достигается с помощью специальной пластины, осуществляющей давление на DBC-керамику в местах установки чипов IGBT и диодов. Благодаря этому при циклическом изменении нагрузки существенно снижаются колебания температуры чипов по сравнению с градиентами, которым подвергаются кристаллы в стандартных модулях.

Для установки чипов на керамическую плату в модулях SKiM применена технология низкотемпературного спекания [6], позволившая устранить вторую по интенсивности отказов проблему, связанную с разрушением паяного соединения силовых кристаллов. По тепловому расширению кремний согласован с керамикой лучше, чем медь, однако усталостные процессы, вызванные термомеханическими напряжениями и накапливающимися в паяном слое, — это основные причины выходов из строя модулей семейства SKiIP. Спеченный серебряный нано-порошок, используемый для соединения чипов в компонентах серии SKiM, имеет гораздо более высокую температуру плавления (960 °C), а также эластичность и теплопроводность.

**Таблица 2.** Характеристики тепловых систем при различных вариантах положения термодатчика

Положение сенсора	А	В	С	Д
Тепловая связь с силовыми кристаллами	Отличная	Допустимая	Допустимая для IGBT, недостаточная для FWD	Низкая
Время реакции на импульс перегрузки	Малое	Среднее	Среднее, большее, чем для В	Низкая
Влияние системы охлаждения на тепловое сопротивление	Низкое	Среднее	Среднее, большее, чем для В	Высокое
Изоляция	Нет	Базовая, обеспечивается DBC-керамикой	Базовая, обеспечивается DBC-керамикой	Безопасный уровень изоляции



**Рис. 13.** Устойчивость к термоциклированию паяного и спеченного соединения чипа, внешний вид соединительных слоев

Испытания показывают, что благодаря применению технологии спекания стойкость SKiM к термоциклированию многократно возрастает. Это подтверждают графики, приведенные на рис. 13а: при градиенте температуры  $dT = 110\text{ °C}$  после 25 000 циклов не происходит увеличение температуры спеченного чипа и его теплового сопротивления, в то время как у паяного кристалла значение  $R_{thjc}$  возрастает более чем на 30%. Необходимо отметить также отсутствие лакун, лучшую равномерность и меньшую пористость спеченного соединения. Это видно на фотографиях, полученных с помощью сканирующего микроскопа (рис. 13б).

### Совершенствование технологий IGBT и диодов

Силовые ключи, предназначенные для работы в сложных климатических условиях, могут обеспечить требуемый уровень надежности только при использовании чипов с расширенным температурным диапазоном. Такими свойствами обладают чипы новейшего поколения, производимые по технологии Trench FS (Field Stop) IGBT<sup>4</sup> (Infineon), и разработанные SEMIKRON диоды серии CAL 4 [7].

Кристаллы IGBT<sup>4</sup> созданы на основе Trench-технологии 3-го поколения, которая используется при производстве модулей SEMIKRON 066, 126 и 176-й серий с рабочим напряжением 600, 1200 и 1700 В соответственно. Эти компоненты отличаются хорошими характеристиками проводимости: напряжение насыщения  $V_{CEsat}$  модулей 126-й серии при номинальном токе и температуре 25 °C не превышает 1,7 В, для компонентов 066-й серии  $V_{CEsat} = 1,45\text{ В}$ . Однако уровень динамических потерь у них достаточно высок, и в режиме «жесткой коммутации» применение ключей данного типа на частотах выше 5–7 кГц нецелесообразно.

В результате модернизации Trench-технологии удалось снизить суммарное значение по-

терь в широком диапазоне частот и обеспечить более плавный характер переключения. При этом новые чипы занимают меньшую площадь, при их производстве требуется меньше кремния, что способствует повышению выхода годных и снижению себестоимости продукции.

Не менее важным достижением является увеличение допустимой рабочей температуры  $T_{jmax}$  кристаллов со 150 до 175 °C. Благодаря этому применение нового поколения модулей IGBT позволяет увеличить запас по перегрузке в динамических режимах и повысить надежность работы преобразователей.

Для того чтобы модернизированные кристаллы IGBT наиболее полно проявили свои преимущества, их необходимо использовать с антипараллельными диодами, согласованными с ними по плотности мощности, статическим и динамическим характеристикам. Для решения этой задачи фирма SEMIKRON создала четвертое поколение быстрых диодов на основе собственной технологии CAL (Controlled Axial Lifetime), главные отличия которой — плавный характер переключения во всем диапазоне рабочих токов, высокий иммунитет к  $dI/dt$  и малый ток обратного восстановления.

Усовершенствование структуры кристаллов позволило на 30% повысить допустимое значение плотности тока, при этом потери переключения остались на уровне, достигнутом в диодах предыдущей генерации CAL3. Использование нового способа пассивации DLC (Diamond Like Carbon) дало возможность увеличить значение предельной рабочей температуры чипов до 175 °C и добиться наилучшего согласования параметров диодов CAL4 с характеристиками IGBT Trench 4. Надежность работы новых модулей IGBT в расширенном температурном диапазоне подтверждена специальными испытаниями, которые включают в себя проверку тока утечки затвора и тока обратного смещения «коллектор–эмиттер», проведенную при предельной температуре (HTRB), а также предельной температуре и влажности (THB).

Сравнительные характеристики трех типов IGBT с рабочим напряжением 1200 В (NPT IGBT с гомогенной структурой, Trench IGBT третьего и четвертого поколения) показаны в таблице 3.

### Закключение

В статье описаны основные особенности силовых ключей, предназначенных для тяжелых условий применения, на примере разработанных компанией SEMIKRON модулей SKiM. В конструкции этих элементов воплотились новейшие технологии и способы проектирования, многие из которых были использованы впервые. В модулях SKiM полностью исключены паяные соединения, а тепловой и электрический контакт всех узлов, включая сигнальные соединения, обеспечивается только за счет прижима. Для установки чипов на изолирующую DBC-подложку применена новейшая технология низкотемпературного спекания.

Все сказанное позволило существенно улучшить основную характеристику модулей, предназначенных для транспортных применений, — стойкость к активному и пассивному термоциклированию. Прижимная технология сборки в сочетании со сверхнизкоиндуктивной DC-шиной, имеющей многоточечный доступ к силовым кристаллам, обеспечили значительное снижение теплового сопротивления и симметричное распределение статических и динамических токов в параллельных чипах. Инновационная конструкция модулей SKiM, применение в них кристаллов IGBT и диодов 4-го поколения с расширенным температурным диапазоном и высокой стойкостью к перегрузкам позволяют успешно использовать данные компоненты в транспортных приводах и других применениях, отличающихся повышенными требованиями к надежности.

### Литература

1. Wintrich A., Beckedahl P., Wurm T. Electrical and thermal optimization of an automotive power module family. Semikron International GmbH, Nürnberg, Germany.
2. Göbl C. Low temperature sinter technology die attachment for automotive power electronic applications. APE 2006, Paris. Conference proceedings.
3. Daucher C. 100% solder-free IGBT Module Purpose-Designed for Automotive Applications. SEMIKRON Elektronik, 2006.
4. Beckedahl P., Tursky W., Scheuermann U. Packaging considerations of an Integrated Inverter Module for Hybrid Vehicles. PCiM. Nürnberg, 2005.
5. Колпаков А. SKiM 63/93 — специализированные силовые модули для электротранспорта // Силовая электроника. 2007. № 4.
6. Колпаков А. Новые технологии силовой электроники // Компоненты и технологии. 2007. № 5.
7. Колпаков А. Trench 4 — универсальная технология IGBT // Силовая электроника. 2007. № 3.
8. Колпаков А. Надежность пружинных контактов в условиях промышленных сред // Силовая электроника. 2006. № 4.

**Таблица 3.** Сравнительные характеристики IGBT различных поколений (рабочее напряжение 1200 В)

Параметр, единица измерения	NPT IGBT <sup>2</sup> (серия 123)	Trench IGBT <sup>3</sup> (серия 126)	Trench IGBT <sup>4</sup> (серия 12T4)
Напряжение насыщения $V_{CEsat}$ , В (@ $I_{Сном}$ , 125 °C)	3,1	2	2,1
Энергия переключения $E_{sw}$ , мДж (@ 100 А, 125 °C)	28	25	18,5
Относительный размер кристалла, % (@ $I_{Сном}$ )	100	70	63
Температурный коэффициент $V_{CEsat}$	+	+	+
Заряд затвора, нКл (@ 100 А)	850	700	630