

# Интеллектуальные модули SEMIKRON

## с улучшенными тепловыми характеристиками

**Испытания, проводимые фирмой SEMIKRON, подтверждают, что надежность силовых модулей, использующих керамическое основание из нитрида алюминия, заметно выше, чем у аналогичных изделий с подложкой из оксида алюминия  $Al_2O_3$ .**

**Андрей Колпаков**

kai@megachip.ru

Прогресс в разработке интеллектуальных силовых модулей IGBT привел к созданию технологии SKiP — Semikron integrated intelligent Power. В изделиях, изготовленных по этой технологии, отсутствуют паяные и сварные соединения, являющиеся главным источником отказов мощных интегральных модулей. «Гибкая» связь слоев модуля позволяет использовать для их производства материалы с различными физическими характеристиками.

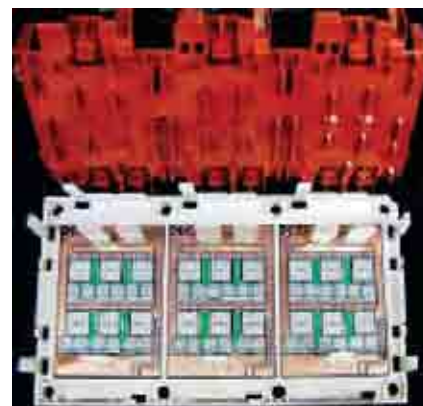
Одним из наиболее перспективных материалов для изготовления керамической печатной платы, на которой устанавливаются силовые кристаллы, является нитрид алюминия — материал, имеющий низкое тепловое сопротивление и достаточно высокое напряжение изоляции. Хорошая теплопроводность нитрида алюминия AlN позволяет не только улучшить тепловые характеристики модулей, но и получить большее значение допустимой плотности тока и, соответственно, мощности. Испытания, проводимые SEMIKRON, показывают также, что надежность силовых модулей, использующих керамическое основание из нитрида алюминия, оказывается заметно выше, чем у аналогичных изделий с подложкой из оксида алюминия  $Al_2O_3$ .

Рынок силовой преобразовательной техники, особенно в области мощных приводов, требует непрерывного повышения мощности электронных модулей, увеличения степени их «интеллектуальности» и при этом уменьшения габаритов. Основным способом снижения размеров модуля одновременно с повышением его мощности является улучшение тепловых характеристик, снижение значения теплового сопротивления. Такую возможность предоставляет использование нитрида алюминия AlN в качестве материала для изготовления керамического основания DBC. Напомним, что плата DBC (Direct Bonded Copper) — это керамическая пластина с медными шинами, нанесенными диффузионным методом, на которой устанавливаются силовые кристаллы. От теплопроводности DBC-платы во многом зависят тепловые характеристики всего изделия.

Благодаря тому, что нитрид алюминия имеет меньший коэффициент теплового расширения,

чем оксид алюминия, модули стандартной конструкции с медным основанием имеют гораздо больший срок службы при использовании AlN-DBC. Это объясняется снижением тепловых стрессов при колебаниях температуры, а термические напряжения являются основным фактором, определяющим надежность силовых модулей. Однако изменение материала керамики в стандартных модулях требует серьезной доработки конструкции. Для модулей без базовой платы, изготовленных по прижимной технологии SEMIKRON «pressure contact», возможно использование любой керамики без каких бы то ни было изменений конструктива.

Благодаря отсутствию жесткого контакта керамики и радиатора, размер керамической платы практически не ограничен. При возникновении механических напряжений DBC-плата просто «плавает» по слою теплопроводящей пасты, не повреждая и не нарушая теплового контакта. Разность в толщине керамики компенсируется с помощью эластичной пружинящей прокладки, входящей в конструкцию модуля. AlN DBC-плата с транзисторами Trench IGBT и плата сопряжения показаны на рис. 1.



**Рис. 1.** Модуль SKiM@5 SKiM601GD126DM с силовыми кристаллами Trench IGBT. Показана рамка с установленной платой DBC и плата сопряжения



Рис. 2. Поперечный разрез модуля SKiM@5

Особенности прижимной технологии показаны на «поперечном разрезе» модуля SKiM5, приведенном на рис. 2, где видны все конструктивные слои модуля.

Плотный и равномерный контакт между керамической подложкой и силовыми кристаллами, необходимый для снижения теплового сопротивления и переходного контактного сопротивления, достигается с помощью специальной платы сопряжения с вертикальными коническими направляющими. Они равномерно передают давление по подложке и обеспечивают постоянный тепловой контакт в местах расположения силовых кристаллов.

Пружинящая прокладка, состоящая из нескольких слоев эластичного пористого материала, передает давление от жесткой прижимной платы к сопрягаемым элементам и обеспечивает равномерность распределения давления. Прижимная плата, имеющая стальную вставку, электрически соединяется с теплоотводом крепежными болтами и служит экраном, снижающим уровень наводок на плату драйвера. Начальная толщина пружинящей прокладки составляет 4,5 мм. После сборки модуля и уплотнения слоев за счет прижима толщина уменьшается до номинального значения 2 мм.

Плата управления устанавливается на специальные крепежные места и соединяется с выводами силовых кристаллов с помощью пружинных контактов. Использование пружинных контактов для электрического соединения DBC-платы с печатной платой драйвера является еще одной уникальной особенностью модулей SEMIKRON. Пружинные контакты, применяемые в изделиях SEMIKRON, обеспечивают низкое переходное сопротивление (менее 50 мОм) и имеют отличную температурную и временную стабильность. Кроме надежного контакта подобное соединение позволяет быстро устанавливать и заменять плату управления.

На рис. 3 представлены характеристики эластичного пружинящего слоя модулей SKiM в начале и конце ускоренных ресурсных испытаний. В области номинальной толщины, отмеченной зеленым цветом, показатели эластичности слоя остаются в линейной зоне. В результате при всех возможных отклонениях толщин жестких слоев в модулях SKiM обеспечивается равномерный и надежный тепловой контакт. Ускоренные испытания проводились в течение 1000 ч при температуре 176 °С после выдержки при

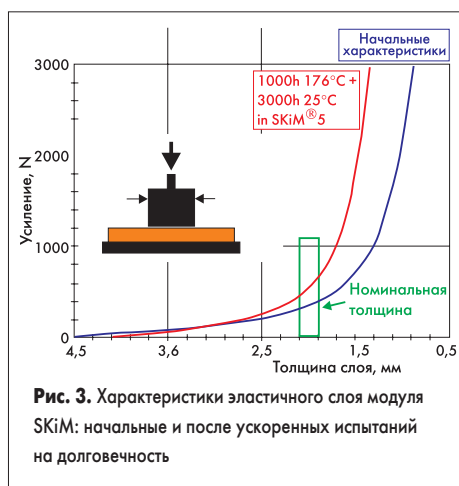


Рис. 3. Характеристики эластичного слоя модуля SKiM: начальные и после ускоренных испытаний на долговечность

комнатной температуре в течение 3000 ч. Согласно стандарту UL 1557 подобные условия испытаний соответствуют 30000 ч при 125 °С и используются для проверки стабильности сопротивления изоляции. Составленный таким образом материал эластичного слоя демонстрирует пластическую деформацию, не превышающую 10%.

Именно такая «гибкость» конструкции модуля позволяет использовать керамические материалы с разной толщиной и неоднородностью.

В таблице 1 приведены данные двух типов подложек, используемых на сегодняшний день в модулях SKiM. Разность в толщине

Таблица 1. Характеристики DBC-подложек модулей SKiM5

Толщина слоя	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AlN
Медное покрытие (верх)	0,40 мм	0,30 мм
Керамика	0,50 мм	0,63 мм
Медное покрытие (низ)	0,40 мм	0,30 мм
Суммарное значение	1,30 мм	1,23 мм

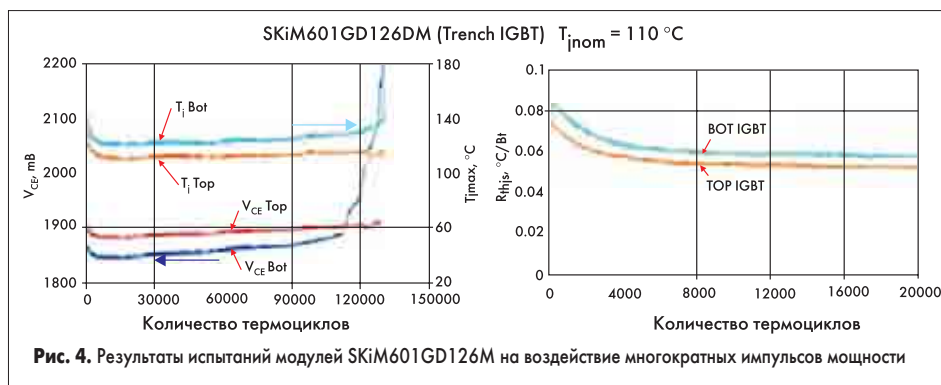


Рис. 4. Результаты испытаний модулей SKiM601GD126M на воздействие многократных импульсов мощности

между ними составляет 0,07 мм. Такая разница, несущественная для модулей с прижимной архитектурой, потребовала бы доработки модуля с несущим медным основанием.

Для подтверждения высокого уровня надежности SEMIKRON подвергает свои изделия многочисленным жестким испытаниям. Одна из таких проверок — испытание некоторого количества модулей до полного отказа (end-of-life test) при термоциклировании, то есть подаче многократных импульсов мощности. Такие испытания являются наиболее информативными, так как они позволяют оценить надежность изделия при различных условиях эксплуатации и сравнить показатели надежности изделий, изготовленных по различной технологии.

В процессе испытаний чипы силовых транзисторов нагреваются до максимальной температуры за счет протекания постоянного тока определенной величины. После достижения температурой заданного предельного значения ток прерывается, кристаллы быстро охлаждаются до температуры теплостока благодаря низкой теплоемкости. Далее скорость охлаждения модуля до минимальной рабочей температуры определяется тепловой постоянной времени радиатора и эффективностью охлаждающей системы.

Данный цикл многократно повторяется с периодом 30–60 с, вызывая ускоренное «старение» модуля. Короткие термоциклы с периодом 1 с и менее воздействуют только на кристалл и его выводы, поэтому для оценки надежности всей конструкции модуля применяются длительные циклы. Такие испытания являются наиболее «приближенными к жизни», так как изменения, которые они вызывают, совпадают с реальными процессами, происходящими с модулем при эксплуатации. Многократное термоциклирование в конечном итоге приводит к резкому изменению параметров или отказу модуля.

При испытаниях производится постоянный мониторинг температуры кристалла и температуры теплостока. Температура кристалла T<sub>j</sub> рассчитывается на основании данных о тепловом сопротивлении модуля. Длительность цикла нагрева изменяется так, чтобы температура кристалла достигала необходимого значения. Подбор длительности времени нагрева позволяет устранить ошибки, вызванные изменениями тепловых сопротивлений в ходе теста, и дает возможность определить оптимальные условия испытаний для одиночных модулей и группы изделий.

Температура радиатора измеряется датчиком, установленным в отверстие в радиаторе на расстоянии 2 мм от чипа. Значение температуры используется для контроля длительности фаз термоцикла. Фаза охлаждения заканчивается при температуре теплостока  $T_h = 40\text{ }^\circ\text{C}$ . При испытаниях контролируется напряжение насыщения  $V_{CE}$  при малом токе коллектора и по этому значению определяется температура кристалла каждого транзистора модуля. В данном случае используется линейная зависимость  $V_{CE} = f(T_j)$ . Дополнительно на каждом цикле проверяется надежность пружинного контакта в цепи управления затвором. Качество работы этой цепи оценивается по скорости выключения тока в фазе охлаждения при подаче запирающего напряжения (-10 В).

Результаты испытаний группы модулей SKiM5 (SKiM601GD126M) приведены на рис. 4. Этот модуль представляет собой 3-фазный мост с кристаллами Trench IGBT на керамической подложке из нитрида алюминия. При данных испытаниях отпирающее напряжение подается на оба транзистора одного из полумостов и измеряется суммарное напряжение насыщения.

В течение первых 2000 циклов наблюдается снижение температуры кристаллов. Напряжение насыщения уменьшается соответственно, благодаря положительному температурному коэффициенту. Такое поведение свойственно модулям, изготовленным по технологии «pressure contact». Оно объясняется снижением теплового сопротивления (см. правый график на рис. 3).

В процессе сборки модуля увеличивающееся давление платы сопряжения на основание приводит к «растеканию» теплопроводящей пасты, находящейся между DBC-керамикой и теплоотводом. Особенно эффективно этот процесс происходит в области расположения прижимных элементов платы сопряжения, где излишки пасты выдавливаются в области, окружающие конусы и силовые кристаллы. Выдавливание пасты происходит в узком зазоре между керамикой и теплостоком, гидравлическое сопротивление которого достаточно высоко. Процесс перемещения пасты, имеющий большую постоянную времени, сопровождается тепловым взаимным перемещением DBC-керамики и теплостока. В описываемом случае распределение теплопроводящего слоя происходит примерно за 8000 циклов, в течение которых тепловое сопротивление уменьшается приблизительно на 25%.

После стабилизации теплового сопротивления температура кристаллов транзисторов в конце цикла нагрева остается неизменной в течение более чем 100000 циклов. После 110000 циклов наблюдается скачок напряжения насыщения транзистора нижнего плеча, свидетельствующий о нарушении соединения кристалла с керамической платой. Это приводит к лавинообразному увеличению теплового сопротивления и тепловыделения. После 120000 циклов процесс нарушения связей идет повсеместно, растет дисбаланс токов, увеличивается плотность тока в оставшихся соединениях. Все это приводит

к полному отказу модуля, наблюдаемому после 129000 циклов.

Как показывают графики изменения теплового сопротивления «кристалл — теплоотвод»  $R_{thjs}$ , приведенные на рис. 4, значение  $R_{thjs}$  не возрастает до начала отказа модуля. На рис. 5 приведено изображение паяного слоя отказавшего модуля SKiM (под транзистором верхнего плеча), полученное с помощью сканирующего акустического микроскопа. По сравнению с местом установки диодов, не подвергавшихся термоциклированию, на поверхности под IGBT-кристаллами наблюдается некоторое осветление поверхности по направлению к кристаллам диодов, свидетельствующее о локальном разрушении паяного соединения. Это подтверждает, что разрушение тепловой связи кристалла и DBC-платы является основной причиной отказа модуля.

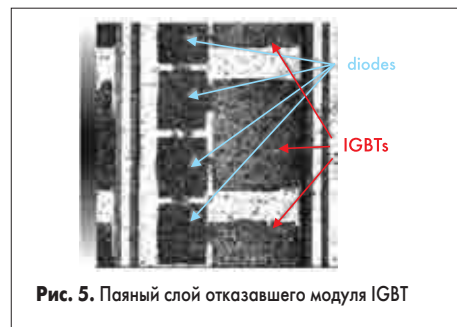


Рис. 5. Паяный слой отказавшего модуля IGBT

Сканирование показало, что никаких нарушений структуры внутри керамической платы не наблюдается. Анализу подверглось также состояние алюминиевой металлизации со стороны эмиттерного вывода кристалла (результаты исследований приведены на рис. 6).

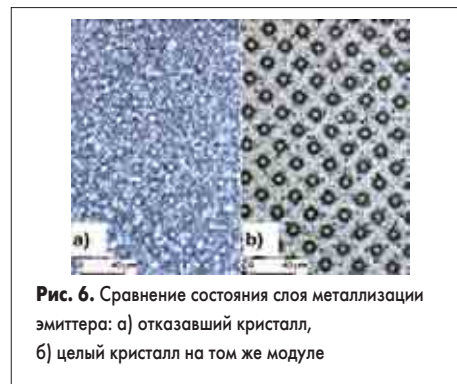


Рис. 6. Сравнение состояния слоя металлизации эмиттера: а) отказавший кристалл, б) целый кристалл на том же модуле

Изменения, показанные на рис. 6, являются результатом разницы коэффициентов теплового расширения кремния и алюминия. Если температура кристалла при воздействии импульсов мощности превышает  $110\text{ }^\circ\text{C}$ , уровень теплового расширения алюминия превышает его «порог эластичности», что приводит к пластической деформации и нарушению поверхностной структуры металла. Таким образом, повреждение алюминиевой металлизации силовых выводов кристаллов IGBT является вторым по значимости фактором, влияющим на надежность работы модулей.

Для статистической обработки результатов испытаний они проводились на выборке из 5 изделий при одинаковых условиях термоциклирования. Все модули показали идентичный характер изменения параметров в результате испытаний: снижение температуры кристалла в начале испытаний, стабилизацию температуры, отказ, проявляющийся как скачок напряжения насыщения. Численные значения приведены в таблице 2, а результаты статистической обработки — на рис. 7.

Таблица 2. Результаты испытаний

№ образца	$T_{jnom}$ , К	Транзистор полумоста	Циклов до отказа
1	110	Верхний	86790
2	110	Нижний	113640
3	110	Верхний	98000
4	110	Нижний	120620
5	90	Нижний	223050

Полученные в ходе тестов значения описываются статистическим распределением Вейбулла, которое обычно используется для анализа результатов испытаний до полного отказа. Плотность вероятности отказов показывает растущую вероятность отказа, когда тестовый параметр  $\chi$  (количество циклов) приближается к параметру  $\beta$ :

$$f(\chi, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} \times \chi^{\alpha-1} \times \exp\left(-\left(\frac{\chi}{\beta}\right)^\alpha\right)$$

На рис. 7 приведены графики, характеризующие вероятность отказа и плотность распределения вероятности. Статистический анализ, проводимый с помощью распределения Вейбулла, показывает, что испытания имеют высокую повторяемость результатов, которая оказывается тем выше, чем выше

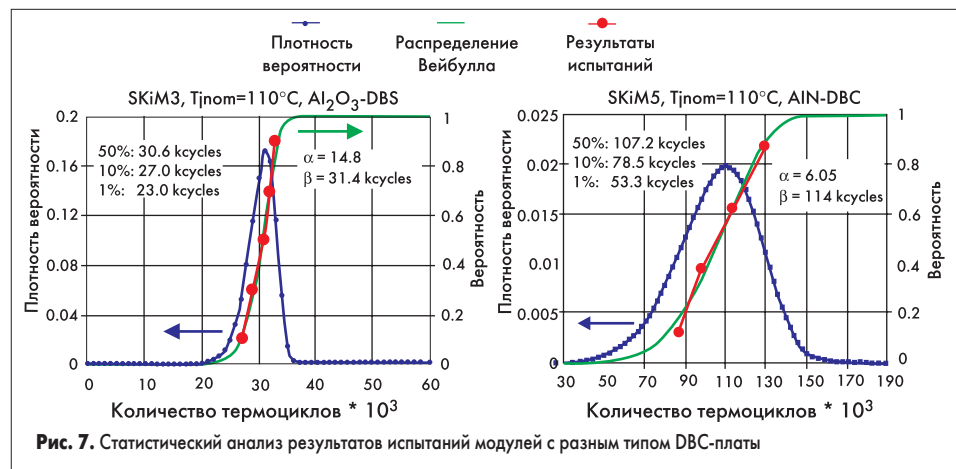


Рис. 7. Статистический анализ результатов испытаний модулей с разным типом DBC-платы

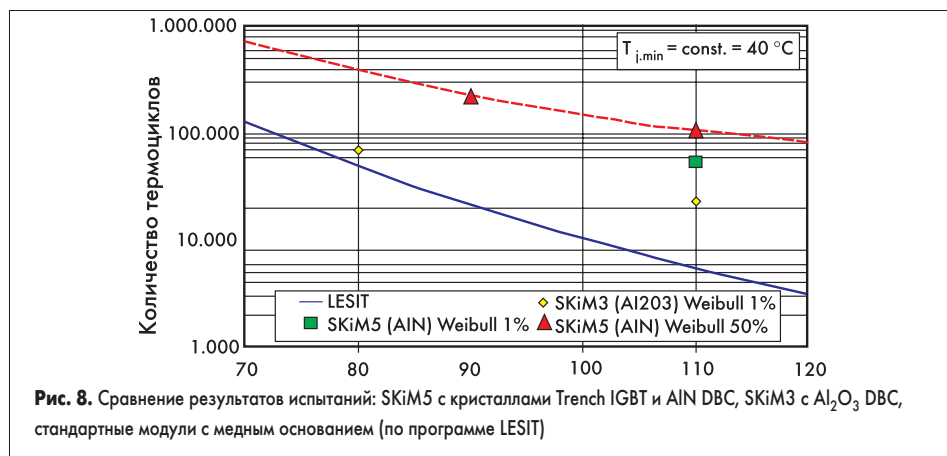


Рис. 8. Сравнение результатов испытаний: SKiM5 с кристаллами Trench IGBT и AlN DBC, SKiM3 с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DBC, стандартные модули с медным основанием (по программе LESIT)

«добротность» графика распределения, определяемая «параметром формы»  $\alpha$ . Это говорит о том, что механизм отказа определен четко и однозначно и подтверждает высокий уровень технологии производства модулей. В левой части рисунка приведены аналогичные графики, полученные по результатам испытаний модулей SKiM3 [6], имеющих подложку из оксида алюминия.

Один из образцов (№5) подвергся испытаниям с градиентом температуры 90 °C, более приближенным к реальным условиям эксплуатации. У данного образца количество термоциклов до отказа составило 223050, что значительно превышает цифры, полученные при градиенте 110 °C.

В 1991 году была принята европейская программа оценки технических решений «Technology Assessment». В рамках этой программы советом по науке Швейцарии сформулированы требования по энергосбережению и надежности изделий силовой электроники, а также требования к системным и информационным технологиям LESIT (Leistungselektronik, Systemtechnik und Informationstechnologie). В процессе осуществления программы LESIT проводились многочисленные испытания надежности силовых модулей различных производителей [5].

Срок службы модулей является функцией средней температуры кристалла и градиента температуры  $\Delta T_j$ . Испытания, проведенные по программе LESIT, показали, что средняя температура является для определения надежности не менее важным параметром, чем перепад температур. Количество циклов до отказа  $N_f$  связано со средней температурой кристалла  $T_m = T_{j,min} + T_j/2$  в соответствии с выражением:

$$N_f = A \times \Delta T_j^\gamma \times \exp\left(\frac{E_a}{k_b \times T_m}\right)$$

где  $k_b$  — постоянная Больцмана. Выражение позволяет получить хорошую аппроксимацию результатов тестов с помощью метода наименьших квадратов по трем параметрам: константа A, показатель степени и энергия активации  $E_a$ .

На рис. 8 приведены графики, позволяющие сравнить зависимость количества термоциклов до отказа от градиента температуры при термоциклировании для модулей

SKiM3 с подложкой из оксида алюминия, модулей SKiM5 с подложкой из нитрида алюминия и силовыми кристаллами Trench IGBT и модулей стандартной конструкции, данные о надежности которых получены по результатам испытаний LESIT. Минимальная температура кристалла для всех испытаний:  $T_{j,min} = 40$  °C. Графики, определяющие вероятность отказа для 1% и 50% изделий, получены путем статистической обработки результатов испытаний. Модули SKiM3 с керамической платой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> демонстрируют значительное преимущество в надежности перед стандартными изделиями с базовой платой. Эпюры, приведенные на рис. 7 и 8, показывают, что применение DBC-керамики из нитрида алюминия позволяет не только улучшить тепловые параметры модулей, но и повысить надежность модулей еще более чем в 2 раза. Проведенные испытания и результаты их обработки подтверждают важность согласования коэффициентов теплового расширения для изделий, рассеивающих значительную мощность и подвергающихся мощным тепловым ударам.

**Заключение**

Большим преимуществом прижимной технологии, разработанной SEMIKRON, является возможность использования различных материалов DBC-платы без ухудшения конструктивных параметров. В настоящее время для изготовления керамического основания используются оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и нитрид алюминия AlN. В будущем планируется также применить новый перспективный материал — Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Замена материала подложки на нитрид алюминия, имеющий

меньшее значение теплового сопротивления, позволяет повысить максимально допустимое значение плотности тока и мощности в минимальных габаритах. На рис. 9 приведены измеренные значения статического теплового сопротивления «кристалл — теплоотвод»  $R_{th,jh}$  для модулей SKiM5, содержащих керамические пластины из различных материалов. Графики показывают величину  $R_{th,jh}$  для антипараллельного диода и транзистора IGBT в исходном состоянии и после 50 термоциклов с градиентом  $-40/+125$  °C. Механизм снижения теплового сопротивления на начальной стадии испытаний описан выше.

Испытания надежности модулей SKiM показывают, что применение керамической DBC-платы из AlN обеспечивает дополнительные преимущества, выражающиеся в более высокой стойкости конструкции изделия к воздействию импульсов мощности. Для типичных режимов эксплуатации это позволяет увеличить срок службы более чем в 2 раза по сравнению с аналогичными модулями с керамической пластиной из оксида алюминия и более чем в 10 раз по сравнению с модулями стандартной конструкции.

**Литература**

1. U. Scheuermann. Advanced Power Modules with AlN-Substrates — Extending Current Capability and Lifetime. SEMIKRON Elektronik GmGH.
2. U. Scheuermann. A Novel Power Module Design and Technology for Improved Power Cycling Capability. Microelectronic Reliability.
3. Rickmer Heubeck. SKiM — a new industrial standard for IGBT-modules in SKiiP technology.
4. U. Scheuermann, J. Grisko, M. Hermwille. SKiM — an Advanced Power Module Family for Inverters.
5. M. Held, P. Jacob, G. Nicoletti, P. Scacco, M. H. Poeh. Fast power cycling test for IGBT modules in traction application. Proc. Power Electronics and Drive Systems. 1997.
6. U. Scheuermann: Power module design for HV-IGBTs with extended reliability. Proc. PCIM. 1999.
7. Колпаков А. И. Обеспечение надежности интеллектуальных силовых модулей // Электронные компоненты. 2003. № 4.
8. Колпаков А. И. SKiM — новое поколение интеллектуальных силовых модулей SEMIKRON // Электронные компоненты. 2003. № 1.

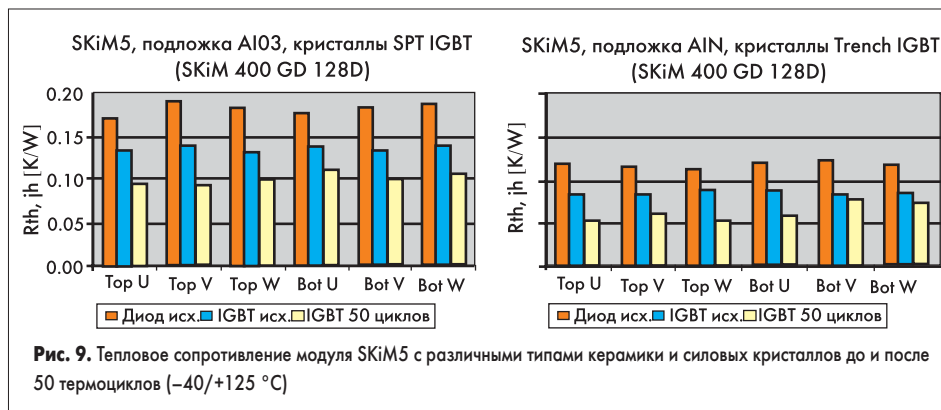


Рис. 9. Тепловое сопротивление модуля SKiM5 с различными типами керамики и силовых кристаллов до и после 50 термоциклов ( $-40/+125$  °C)