

# SKiN-технология:

## силовая электроника завтрашнего дня

Современный рынок автоэлектроники предъявляет самые жесткие требования к силовым модулям, предназначенным для применения в составе тягового привода. По сочетанию тепловых и электрических характеристик, весу и габаритам, а также показателям надежности данные компоненты в полном смысле могут быть отнесены к классу high-end. Поиск новых конструктивных решений привел к разработке метода низкотемпературного спекания (Sinter technology), позволившего отказаться от паяных соединений, являющихся основной причиной отказов модулей, работающих в режиме циклической нагрузки. Созданная на основе этого производственного процесса технология SKiN позволила устранить последнее слабое место классических силовых ключей — сварное соединение алюминиевых выводов чипов.

Юрген Штегер  
(Jurgen Steger)

Перевод и комментарии:  
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Существует две основные причины поиска кардинально новых конструкторско-технологических решений, способных заменить действующие, отработанные производственные процессы. Первая заключается в том, что существующие технологии не могут обеспечить современные требования по надежности, предъявляемые производителями электрических и гибридных транспортных средств. Кроме того, алюминиевые проводники, традиционно соединяемые методом ультразвуковой сварки (рис. 1), не способны полностью реализовать нагрузочные характеристики последних поколений кристаллов MOSFET/IGBT из-за ограниченной токонесущей способности.

Несмотря на то, что данная технология освоена достаточно хорошо, наличие сварных соединений ограничивает не только токовые характеристики, но и срок службы силовых модулей из-за разницы коэффициентов теплового расширения алюминиевых проводников, материалов металлизации кристаллов и токонесущих шин DBC-подложки. Испытания на термоциклирование ключей классической конструкции показывают, что сварной слой

неизбежно испытывает деградацию на финальной стадии теста.

Поиск замены стандартному способу подключения кристаллов уже много лет ведется технологами и производителями элементной базы. Большинство предлагаемых альтернативных вариантов связано с модернизацией процессов пайки и сварки и применением промежуточных связей. Хорошие результаты были получены при использовании паяных полосковых выводов [1], а также при замене алюминиевых проводников на медные. Однако подобные решения создают серьезные технологические проблемы, требуют изменения способа металлизации кристаллов и их монтажа. Например, увеличение площади петли проводника повышает стойкость к термоциклированию, но снижает величину допустимой токовой нагрузки, кроме того, такое решение не пригодно для низкопрофильных модулей.

Воздушные полости, имеющиеся в зазоре между радиатором и базовой платой, должны заполняться теплопроводящей пастой. Однако даже самые лучшие материалы, предназначенные для этой цели, проводят тепло гораздо хуже, чем DBC-керамика и медь, поэтому слой пасты вносит основной вклад в величину сопротивления  $R_{th(c-s)}$ . Большой проблемой также является стабильность ее свойств в течение срока службы. На рис. 2 показано, как после мно-

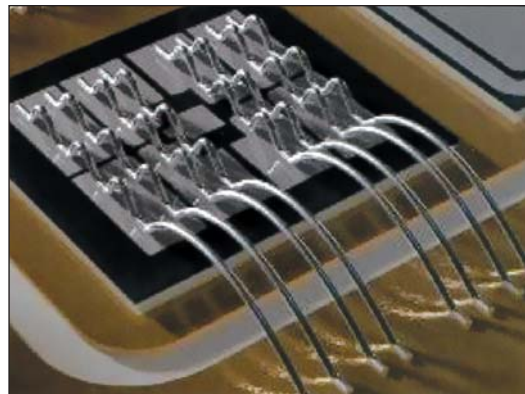


Рис. 1. Ультразвуковая сварка алюминиевых проводников — самая распространенная технология подключения выводов кристаллов



Рис. 2. Изменение структуры термопасты после длительной эксплуатации

голетней эксплуатации в составе ветроэнергетической установки произошло изменение структуры пасты: она превратилась в жидкий гель и вытекла из зазора. Следствием подобного эффекта разделения компонентов, называемого также pump-out effect, становится перегрев и отказ силового модуля. Отметим, что до сих пор не существует стандартной процедуры оценки стабильности свойств термопасты в течение срока службы современной аппаратуры (15–20 лет).

Обеспечение стойкости к внешним климатическим и механическим воздействиям, а также влиянию грязных промышленных сред играет важную роль при проектировании электроники для электротранспорта. Транспортный привод становится все более мощным и компактным, при этом его надежность показатели должны обеспечиваться, несмотря на предельно высокую плотность тока и сложные условия охлаждения.

### Технология низкотемпературного спекания

Процесс диффузионного спекания серебра (Ag) был разработан компанией Siemens в конце 80-х годов для соединения молибденовых дисков большой площади с кристаллами тиристоров. Исследования, проведенные Брауншвейгским техническим университетом в середине 90-х, показали, что технология спекания может быть адаптирована и использована вместо пайки при установке чипов IGBT и диодов на изолирующую DBC-подложку. С 2009 г. она внедрена компанией SEMIKRON в серийном производстве модулей SKAI, SKiM и SKiP 4, предназначенных для эксплуатации на транспорте.

Спеченный диффузионный слой отличается от паяного лучшей тепло- и электропроводностью, низким значением КТР и высоким сопротивлением растяжению. Однако самым главным фактором является многократное повышение температуры плавления (для спеченного серебра — +961 °C), что необходимо для увеличения срока службы. Важность этого показателя может быть проиллюстрирована с помощью концепции гомологической температуры  $T_H$ , хорошо известной специалистам в области материаловедения. Этот параметр представляет собой отношение температур  $T_j$  (рабочей) и  $T_m$  (плавления) по абсолютной шкале.

При  $T_j = 150$  °C значение  $T_H$  для стандартного припоя SnAg [3], используемого в силовых модулях и имеющего температуру плавления +221 °C, составляет 86%. Даже у специального высокотемпературного припоя AuGe [3] ( $T_m = +363$  °C) показатель  $T_H = 67\%$ . Для диффузионного слоя серебра гомологическая температура достигает всего лишь 34% от  $T_j$ !

Согласно теории материалов, механическая стабильность свойств достигается при гомологической температуре не более 40%, интервал 40–60% соответствует диапазону ползучести, характеризующемуся высокой чувствительностью к деформации, а при  $T_H > 60\%$  считается, что материал не способен выдерживать долговременную нагрузку. Отметим, что по-

следний случай относится ко всем припоям, применяемым в силовых модулях.

Таким образом, серебро способно обеспечить долговременную стабильность свойств соединения керамической подложки с радиатором, кремниевыми кристаллами и выходными терминалами. Процесс спекания открывает широкие возможности для применения новых типов высокотемпературных кристаллов. Благодаря существенному увеличению показателей надежности и улучшению тепловых характеристик силовых модулей, изготовленных с применением Sinter-технологии, они могут быть использованы в устройствах с предельно жесткими режимами эксплуатации, к которым относятся транспортные приводы и преобразователи энергетических установок.

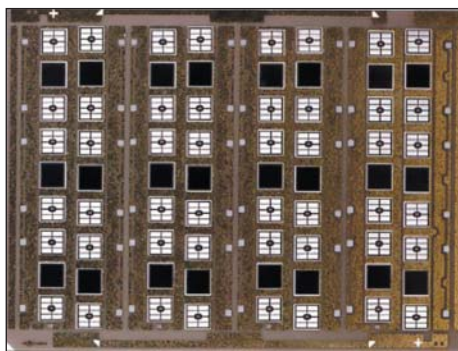


Рис. 3. DBC-плата 5×7" с четырьмя керамическими подложками (до лазерной резки) со спеченными чипами

На рис. 3 приведен пример DBC-платы размером 5×7", содержащей четыре керамические подложки со спеченными чипами и используемой при серийном производстве специализированных модулей для автомобильных применений. Тест на скручивание, демонстрирующий стойкость спеченного соединения к экстремально высокому механическому стрессу (изгибу подложки), показан на рис. 4. Как видно на фотографии, несмотря на растрескивание кристалла соединительный слой не разрушился. При аналогичных испытаниях паяного чипа наблюдается отслоение его обломков от DBC-платы.



Рис. 4. Тест «на скручивание» показывает высокую устойчивость спеченного соединения к механическим воздействиям

Процедура установки кристаллов и их спекания с изолирующей подложкой близка к традиционной, отличие состоит прежде всего в материале соединительного слоя. Однако дальнейшие технологические этапы, включающие ультразвуковую сварку выводов, электрические испытания, лазерную резку и окончательный оптический контроль, при производстве новых компонентов проходят абсолютно иначе.

### SKiN-концепция

Несмотря на успешное внедрение метода спекания для установки кристаллов на подложку, ряд проблем оставался нерешенным. К ним относится сварное подключение алюминиевых выводов чипов, паяное соединение DBC-подложки и базовой платы, а также необходимость применения теплопроводящей пасты при установке модуля на теплоотвод. Ответом на все эти вопросы стала SKiN-технология, в основе которой лежит упомянутый выше процесс низкотемпературного спекания серебра.

Концепция SKiN-модулей (рис. 5) состоит в следующем. Контактные площадки на поверхности чипов спекаются с токонесущими шинами гибкой SKiN-пленки, а основания

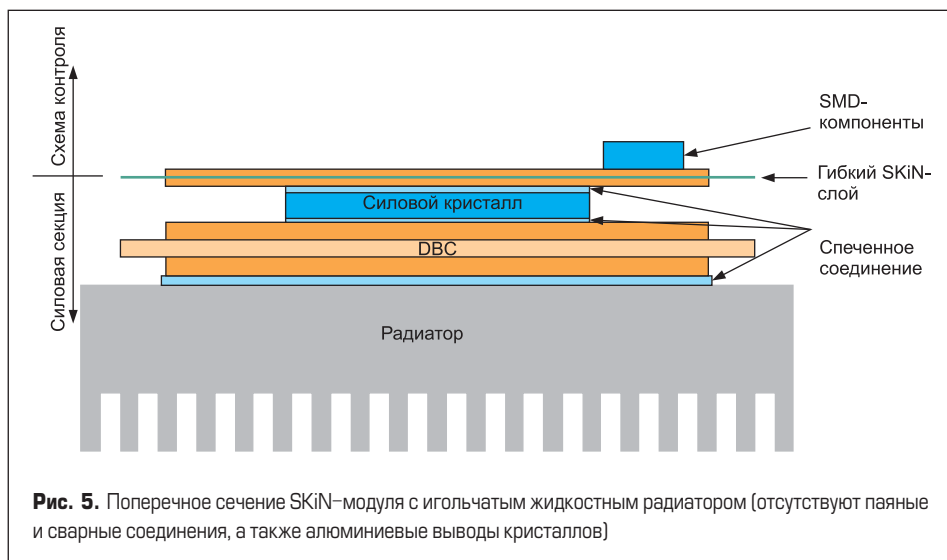


Рис. 5. Поперечное сечение SKiN-модуля с игольчатым жидкостным радиатором (отсутствуют паяные и сварные соединения, а также алюминиевые выводы кристаллов)

кристаллов — с DBC-подложкой, которая таким же способом соединяется с базовой платой или теплоотводом. Толщина металлизации несущей полиамидной пленки соизмерима с диаметром проводников, используемых для подключения выводов кристаллов в модулях традиционного типа. Тонкий слой меди на ее верхней стороне предназначен для подключения затворов IGBT и контактов сенсоров, его соединение с шинами нижнего слоя осуществляется посредством переходных отверстий. Поверхность SKiN-пленки может быть использована для размещения SMD-компонентов, например резисторов затвора, элементов схемы управления или термодатчиков.

Как показано на рис. 5, еще один спеченный слой служит для монтажа чипов IGBT/FWD на изолирующую DBC-подложку. Этот процесс пригоден для всех выпускаемых в настоящее время видов кристаллов, перед спеканием требуется только дополнительная обработка поверхности благородными металлами.



Рис. 6. Верхняя сторона SKiN-пленки перед спеканием с подложкой

На рис. 6 показана верхняя сторона гибкой SKiN-пленки, подготовленной для позиционирования и спекания. Медные сигнальные дорожки нанесены на пленку методом напыления; области, предназначенные для соединения с кристаллами (белые прямоугольники), покрываются серебряной нано-пастой через трафарет.

На первом этапе сборки производится установка кристаллов на изолирующую подложку и их спекание, после этого края чипов покрываются изолирующим материалом. Радиатор, внешние терминалы, кристаллы и DBC-подложка с нанесенной пастой помещаются в пресс для спекания, где формируется соединительный слой теплоотвода, подложки и силовых выводов. Спекание может осуществляться в ходе одного или двух последовательных этапов. После этого производится установка пластиковой рамки, предназначенной для фиксации сигнальных контактов в правильном положении и позиционирования самого силового ключа. Отметим, что применение описанного производственного процесса позволяет создавать модули со сверхнизким профилем.

Отвод тепла от кристаллов и силовых терминалов, так же, как и их подключение, в SKiN-модулях обеспечивается спекаемыми слоями. На рис. 7 показаны DC/AC-выводы, сделанные



Рис. 7. Силовые DC/AC-терминалы и жидкостный игольчатый радиатор с зоной спекаемого подключения

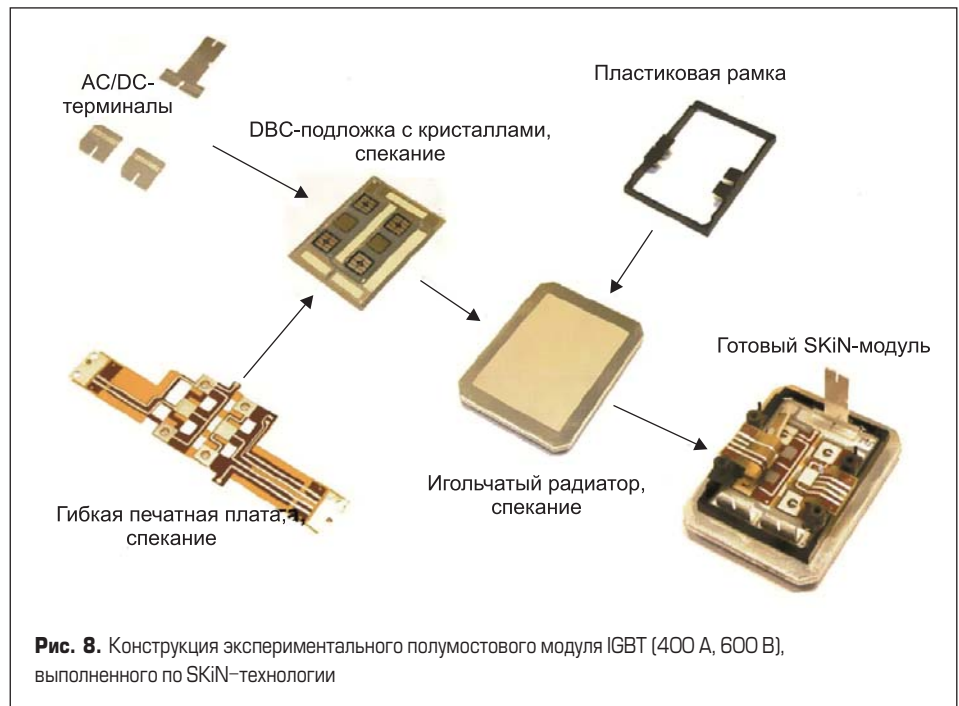


Рис. 8. Конструкция экспериментального полумостового модуля IGBT (400 А, 600 В), выполненного по SKiN-технологии

из меди с серебряным покрытием, и алюминиевый жидкостный игольчатый радиатор.

На рис. 8 показано, как соединяются узлы SKiN-модуля 6 класса с номинальным током 400 А, содержащего два 200-А IGBT-чипа и один 400-А диод в каждом плече, а также датчик температуры. Внешний вид укомплектованного силового ключа представлен на рис. 9. Особенностью показанной конструкции является использование гибкой SKiN-пленки для соединения активных элементов и сигнальных контактов. Топология выводов нанесенных на пленку трасс позволяет осуществлять ее подключение к печатной плате драйвера. Контакты управления двух ключей выведены соответственно налево и направо по длинной стороне, а силовые терминалы DC-питания и выхода полумоста расположены по короткой стороне радиатора друг напротив друга.

### Результаты тестирования

Испытания тестового модуля показали, что замена сварных алюминиевых проводников на SKiN-пленку позволяет кардинально улучшить электрические характеристики. Детальный анализ параметров тестовых силовых ключей одинаковой конструкции, от-

личающихся только способом подключения кристаллов и терминалов, опубликован в [4].

Выявлено, что применение гибкой пленки с токонесущими шинами значительно повышает перегрузочную способность оппозитных диодов. Тепловое сопротивление  $R_{th(j-a)}$  «кристалл-окружающая среда» нового модуля составляет 0,44 Ксм<sup>2</sup>/Вт, что на 35% ниже, чем у компонента стандартного типа. Примерно настолько же увеличивается и максимальная плотность тока SKiN-модуля.

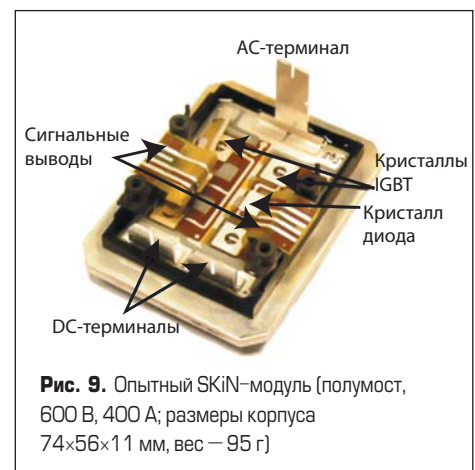
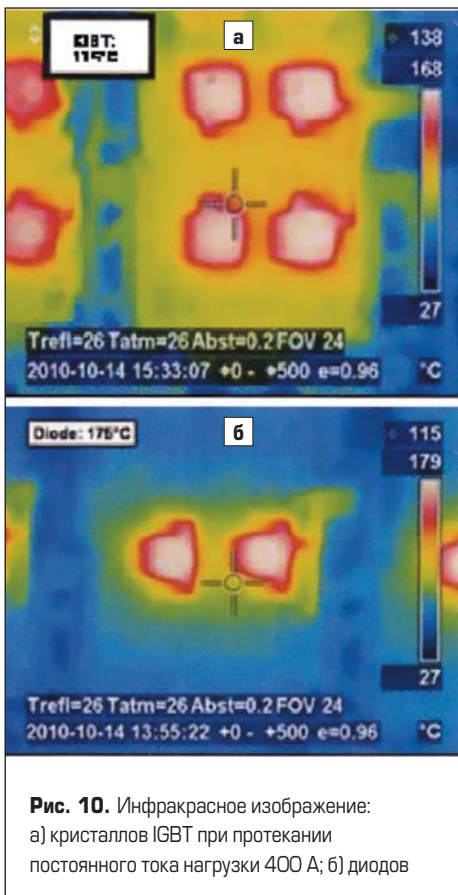


Рис. 9. Опытный SKiN-модуль (полумост, 600 В, 400 А; размеры корпуса 74×56×11 мм, вес — 95 г)



**Рис. 10.** Инфракрасное изображение: а) кристаллов IGBT при протекании постоянного тока нагрузки 400 А; б) диодов

На рис. 10 приведена полученная с помощью инфракрасной камеры температурная диаграмма кристаллов IGBT и FWD, находящихся под полной нагрузкой. Видно, что распределение температуры по поверхности чипов и между ними очень равномерное. Расстояние между кристаллами выбрано таким образом, чтобы исключить тепловое взаимодействие.

В процессе испытаний на термоциклирование силовые ключи нагреваются при пропуске фиксированного тока, а затем охлаждаются до температуры радиатора, задаваемой условиями теста. Предельное количество циклов может варьироваться в зависимости от средней и максимальной температуры, а также значения ее градиента. Нагрев и охлаждение модулей в ходе испытаний производится при заданных значениях мощности рассеяния, температуры  $T_{jmax}$  или тока  $I_{Cmax}$  [5].

Пассивное термоциклирование в реальных условиях обусловлено в первую очередь изменениями температуры окружающей среды. При этом наибольшему воздействию подвергаются сложные интегральные конструкции, состоящие из жестко соединенных элементов с разными коэффициентами теплового расширения. У силовых модулей это радиатор, изолирующая керамическая подложка, кристаллы и их выводы (или SKiN-пленка в нашем случае).

Экстенсивный тест на термоциклирование проводился при предельных значениях температуры  $-50$  и  $+150$  °C и скорости нагрева/охлаждения 3 К/мин. Силовые ключи выдерживают от нескольких сотен до нескольких тысяч таких воздействий, после чего начи-

**Таблица.** Повышение стойкости к термоциклированию в ходе совершенствования технологий IGBT

Технология	$N_f$ ( $\Delta T_j = 70$ К)	Коэффициент улучшения	Источник
Стандартный модуль с базовой платой (начало 90-х)	15 800	1	LESIT 1997
Усовершенствованный модуль с базовой платой (2010 г.)	79 000	5	EPE 2011
Модуль SKiM со спеченными чипами и модифицированной геометрией Al проводников	647 000	41	EPE 2011
SKiN-модуль	3 024 000	191	CIPS 2012

нается разрушение соединения наибольшей площади, у SKiN-модулей это спеченный слой между радиатором и подложкой. Проведенные эксперименты показали, что его толщина и структура являются ключевыми параметрами, определяющими стойкость SKiN-модулей к пассивному термоциклированию.

**Заключение**

Технология SKiN позволяет полностью отказаться от наиболее проблемных (паяных и сварных) элементов конструкции силовых модулей. Подключение кристаллов, а также соединение керамической DBC-подложки с радиатором и выходными терминалами производится методом спекания серебряной nano-пасты. Большое количество алюминиевых проводников, необходимых для отвода тока от кристаллов IGBT и диодов, заменяется одной гибкой пленкой с медными токонесущими шинами, что позволяет повысить контактную площадь чипов почти в четыре раза. Отметим, что процесс ультразвуковой сварки выводов является одним из самых сложных и длительных, поэтому применение SKiN-технологии дает возможность устранить одно из «узких мест» в процессе производства.

Для демонстрации возможностей новой концепции по сравнению с традиционными методами корпусирования силовых ключей была проведена серия сравнительных тестов специально разработанных прототипов. Реализация SKiN-концепции и включение в состав модуля высокоэффективного игольчатого жидкостного радиатора позволило в два раза повысить нагрузочные характеристики. Только одно устранение слоя теплопроводящей пасты привело к снижению на 25% сум-

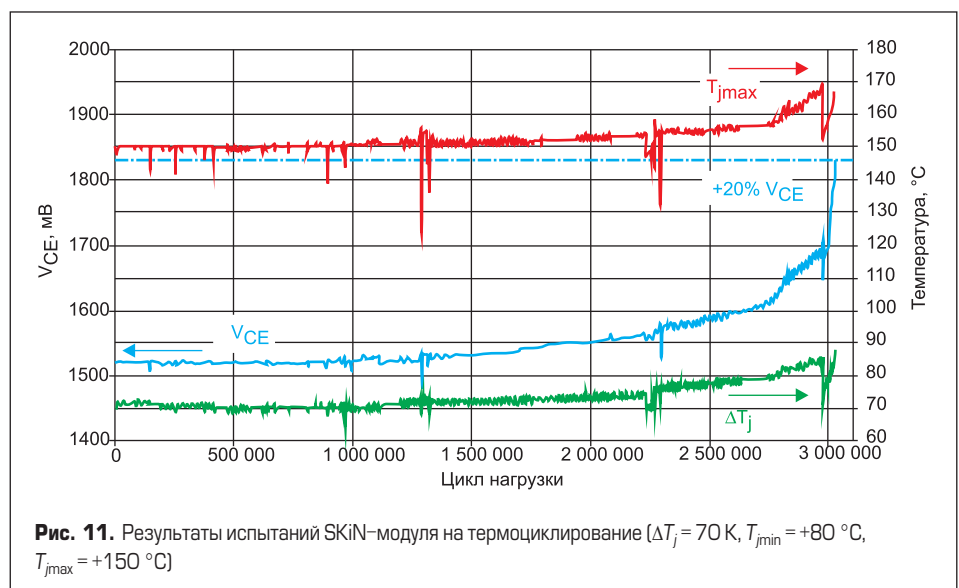
марного значения теплового сопротивления «кристалл–окружающая среда»  $R_{th(j-a)}$ .

Модификация топологии соединений и повышение площади контактной поверхности чипов (около 27%) позволило повысить перегрузочную способность диодов, а также снизить паразитную индуктивность цепи коммутации на 2 нГн ( $-10\%$ ). Проведенный детальный анализ выявил, что данный результат является следствием ликвидации петель проводниковых выводов чипов и снижения площади токонесущих цепей на гибкой SKiN-пленке.

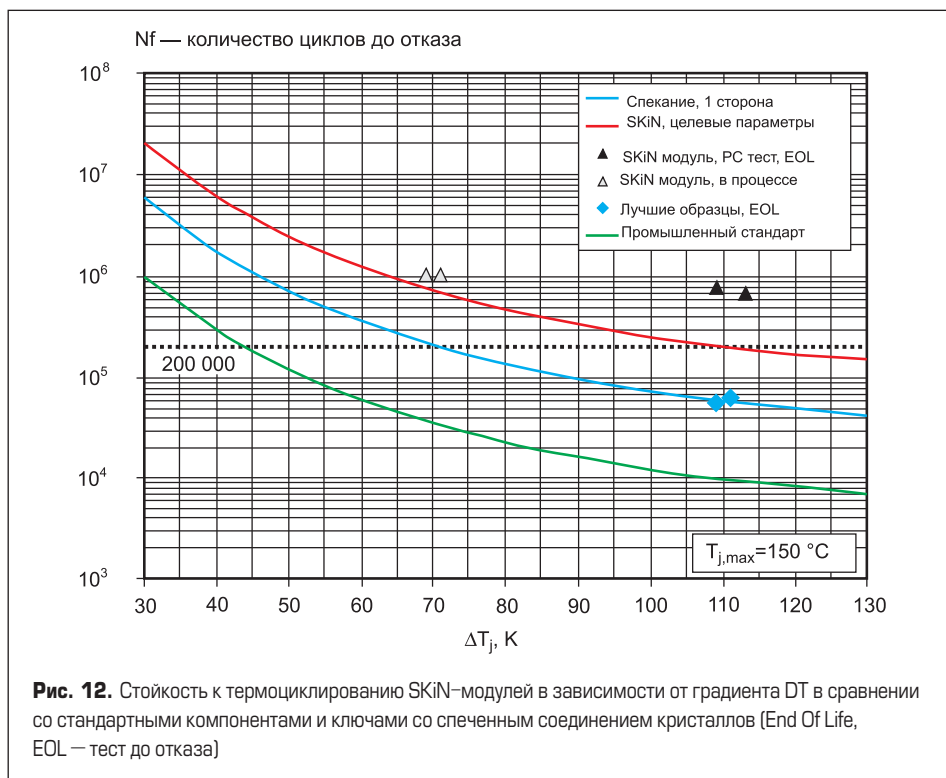
Однако наиболее важным результатом внедрения SKiN-концепции считается кардинальное повышение стойкости к термоциклированию. На рис. 11 показаны кривые, полученные в ходе теста на воздействие активных циклов с градиентом  $\Delta T_j = 70$  К. Нагрев кристаллов обеспечивался за счет протекания импульсов постоянного тока ( $t_{on} = 1,2$  с;  $t_{off} = 1,8$  с). Как видно на рисунке, отказ модуля, зафиксированный по резкому увеличению напряжения насыщения  $V_{CE}$  произошел примерно после 3 млн циклов.

Данные, приведенные в таблице, позволяют сравнить надежность силовых ключей различных поколений. Испытания стандартных модулей IGBT с медной базовой платой проводились в рамках проекта LESIT (середина 90-х годов), посвященного оценке влияния активного термоциклирования на срок службы электронных компонентов. Таблица демонстрирует прогресс технологий IGBT за прошедшие 20 лет, позволивший к 2010 г. улучшить показатель  $N_f$  примерно в пять раз.

Замена пайки чипов на спекание серебра в сочетании с усовершенствованной геометрией алюминиевых выводов привела к увеличению срока службы примерно в восемь



**Рис. 11.** Результаты испытаний SKiN-модуля на термоциклирование ( $\Delta T_j = 70$  К,  $T_{jmin} = +80$  °C,  $T_{jmax} = +150$  °C)



раз. Дальнейшее пятикратное улучшение показателей надежности обеспечивает применение SKiN-технологии.

Результаты, полученные при испытаниях модулей SKiN, оказались лучше расчетных (целевых) значений, показанных на рис. 12 в виде красной кривой. При градиенте 110 К новые силовые ключи способны выдерживать около 700 тыс. циклов, что во много раз превышает возможности компонентов классической конструкции (10 тыс. циклов — зеленая линия).

Совершенствование конструкции модулей проводилось постоянно с начала 90-х, но только концепция SKiN вобрала в себя все достижения последних лет. Силовые ключи, разработанные с применением этой технологии, отличаются отличными тепловыми характеристиками, высокой перегрузочной способностью, низким значением паразитной индуктивности цепей комму-

тации, а также чрезвычайно высокой стойкостью к термоциклированию. Сочетание этих показателей позволяет SKiN-модулям работать в предельно жестких условиях эксплуатации, свойственных современному транспортному приводу. Диффузионное спекание расширяет диапазон рабочих температур до  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$  без ущерба надежности, таким образом, эта технология позволяет полностью реализовать возможности кристаллов SiC.

Реализация SKiN-концепции позволяет полностью пересмотреть стандартные подходы к конструированию силовых модулей и отказаться от широко применяемых в промышленности технологий пайки, сварки и нанесения теплопроводящей пасты. Благодаря улучшению теплового интерфейса силовых кристаллов и использованию высокоэффективного игольчатого радиатора удалось в два раза снизить величину рассеиваемой инвер-

тором мощности. При этом 30% снижения общего значения теплового сопротивления у модулей SKiN достигнуто за счет замены слоя термопасты на спекаемое соединение. Модификация геометрии соединений и увеличение контактной поверхности чипов позволили на 27% повысить предельное значение тока оппозитных диодов.

Дальнейшие работы в области SKiN-технологии направлены на исследование возможностей двухслойных гибких пленок, применение которых обеспечивает дальнейшее снижение теплового сопротивления за счет двухстороннего охлаждения.

## Литература

1. Hille F., Umbach F., Raker T. Failure mechanism and improvement potential of IGBTs short circuit operation // Proc. ISPSD. Hiroshima. 2010.
2. Göbl C. Low temperature sinter technology die attachment for power electronic applications // Proc. CIPS 2010. Nuremberg. 2010.
3. Patent № 10 2007 006 706 (DE).
4. Beckedahl P., Hermann M., Kind M., Knebel M., Nascimento J., Wintrich A. Performance comparison of traditional packaging technologies to a novel bond wire less all sintered power module // Proc. PCIM. Nuremberg. 2011.
5. Stockmeier T., Beckedahl P., Göbl C., Malzer T. SKiN: Double side sintering technology for new packages // ISPSD. 2011.
6. Beckedahl P., Hermann M., Kind M., Knebel M., Nascimento J., Wintrich A. Performance comparison of traditional packaging technologies to a novel bond wire less all sintered power module // PCIM. 2011.
7. Scheuermann U., Schmidt R. Impact of Solder Fatigue on Module Lifetime in Power Cycling Tests // Proc. EPE. Birmingham. 2011.
8. Held M., Jacob P., Nicoletti G. Fast Power Cycling Test for IGBT in Traction Application // Proc. Power conversation and Drive Systems. 1997.
9. Scheuermann U. Reliability of Planar SKiN Interconnect Technology // Proc. CIPS. 2012.