

Силовые модули завтрашнего дня: без проводников, паяных соединений и теплопроводящей пасты

Необходимость совершенствования технологий корпусирования силовых модулей вызвана постоянно растущими требованиями увеличения плотности мощности, повышения надежности и снижения стоимости. Технологические возможности традиционных методов пайки и ультразвуковой сварки достигли своих пределов, их применение не позволяет полностью реализовать возможности новейших кристаллов с расширенным температурным диапазоном.

Теперь мы можем с уверенностью сказать, что решение указанных проблем найдено. Внедрение процесса низкотемпературного спекания серебряного порошка уже позволило полностью отказаться от пайки. На сегодня в силовой электронике осталось только одно «узкое место», от преодоления которого зависит ее дальнейшее развитие: ультразвуковая сварка проводниковых выводов кристаллов. Разработанная компанией SEMIKRON технология SKiN дает возможность осуществлять все промежуточные связи в силовом модуле с помощью гибких пленок.

Петер БЕКЕДАЛЬ (Peter BECKEDAHN)
Перевод и комментарии:
Андрей КОЛПАКОВ
Andrey.Kolpakov@semikron.com

Введение

Поиск альтернативы ультразвуковой сварке идет все последние годы этим вопросом занимаются ведущие производители силовой элементной базы и научно-исследовательские центры. Несмотря на то, что данная технология освоена достаточно хорошо, сварные соединения не могут обеспечить требуемый уровень надежности, что

связано с разницей коэффициентов теплового расширения алюминиевых проводников, материалов металлизации кристаллов и токонесущих шин изолирующей подложки. Большинство предлагаемых альтернативных вариантов связано с модернизацией процессов пайки и сварки, а также с использованием промежуточных связей.

На выставке PCIM-2011 компания SEMIKRON представила инновационную технологию SKiN, которая позволяет производить все соединения внутри силового модуля с помощью медных шин, напыленных на гибкую несущую пленку и подключаемых методом низкотемпературного спекания. Этот процесс также может быть использован для монтажа изолирующей DBC-подложки на базовую плату, что дает возможность устранить паяный слой наибольшей площади. Опытные силовые модули, выполненные с применением технологии SKiN, уже продемонстрировали рекордные показатели плотности мощности и стойкости к термоциклированию.

Технология низкотемпературного спекания и SKiN-концепция

Технология низкотемпературного спекания серебряного нанопорошка (Sinter-технология) была внедрена для замены пайки при установке чипов IGBT и диодов на изолирующую DBC-подложку [2]. С 2009 года она используется компанией SEMIKRON в серийном производстве модулей SKAi, SKiM и SKiP 4, предназначенных для эксплуатации на транспорте и отличающихся высокой стойкостью к термоциклированию. Очевидно, что серебро может быть хорошим материалом припоя, однако оно имеет очень высокую температуру плавления (более 900 °C). Отметим, что одной из задач внедрения новой технологии было сохранение действующего паяльного обо-



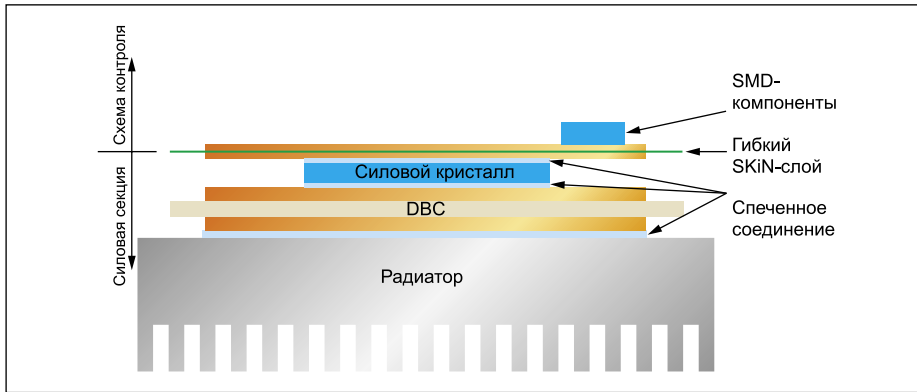


Рис. 1. Упрощенная конструкция SKiN-модуля

рудования. Применение наночастиц серебра в органическом растворителе и повышенного давления спекания позволило решить эту задачу.

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 ветроэнергетических установок.

Тем не менее ряд проблем оставался нерешенным. К ним следует отнести 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. 1) состоит в следующем. Контактные площадки на поверхности чипов спекаются с токонесущими шинами гибкой SKiN-пленки, а основания 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 видно на рисунке, 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.

Технология Sinter пригодна и для соединения керамической подложки с алюминиевым теплоотком: этот контактный слой имеет наибольшую площадь, и он больше других подвержен действию термомеханических стрессов. Пористая серебряная структура, в отличие от всех используемых промышленных припоев, обладает высокой эластичностью, ей не присущ эффект накопления усталости.

Установка силовых терминалов на DBC-подложку также производится путем спекания, обеспечивающего им высокую токонесущую способность и стойкость к механическим воздействиям.

Применение SKiN-технологии дает возможность кардинально улучшить следующие параметры силовых ключей:

- Плотность мощности. Замена теплопроводящей пасты на спекаемый слой Ag позволяет увеличить плотность тока модуля за счет снижения теплового сопротивления «корпус – радиатор». Большая площадь металлизации поверхности чипов обеспечивает лучшую и более равномерную теплоотдачу.

- Надежность. Замена тонких алюминиевых проводников и их сварных соединений тонкой пленкой со спекаемой металлизацией увеличивает стойкость к термострессу благодаря лучшему сочетанию коэффициентов теплового расширения (КТР) сопрягаемых материалов, высокой эластичности серебряного слоя и большей площади контактной поверхности кристаллов.
- Электрические характеристики. Замена тонких алюминиевых проводников и их сварных соединений гибкой пленкой со спекаемой металлизацией улучшает нагрузочные свойства чипов за счет повышения площади электрического контакта и его сечения. Кроме того, это позволяет снизить значение паразитной индуктивности за счет улучшения геометрии трассировки и уменьшения площади токовых петель.

Дизайн SKiN-модулей

Эффективность решений, заложенных в SKiN-технологии, проверялась путем сравнения характеристик опытного полумостового модуля (600 В, 400 А) и «референтного» силового ключа с аналогичными характеристиками. В обоих случаях для охлаждения использовался алюминиевый игольчатый радиатор.

В каждом плече SKiN-модуля установлено параллельно два 200-амперных чипа IGBT и один CAL-диод с номинальным током 275 А. Силовые AC- и DC-терминалы размещены на коротких краях корпуса, сигнальные подключения затворов выполнены с помощью гибкой SKiN-пленки, расположенной поперек DBC-платы (рис. 2).

Для получения максимально достоверных результатов сравнения был создан «референтный» силовой ключ со сварным соединением алюминиевых выводов чипов, полностью

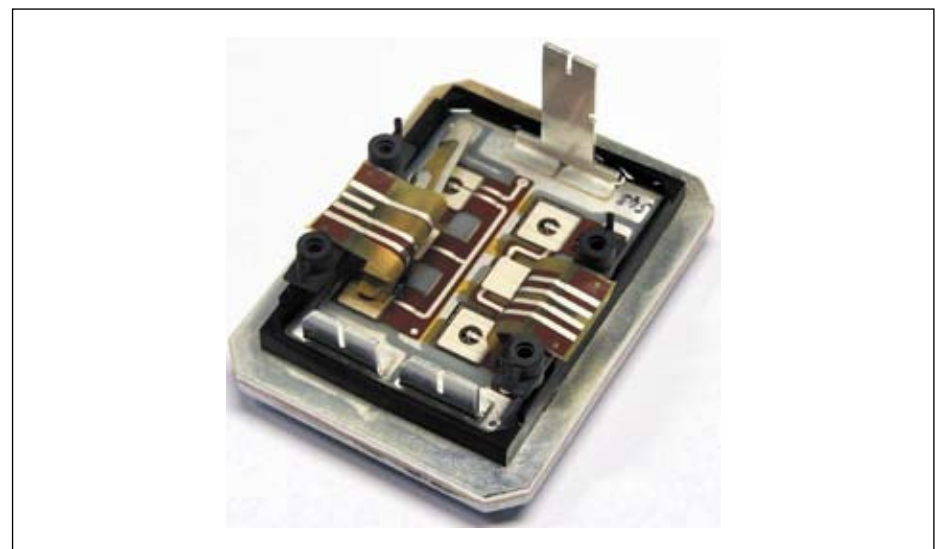


Рис. 2. Опытный SKiN-модуль (полумост, 600 В, 400 А)

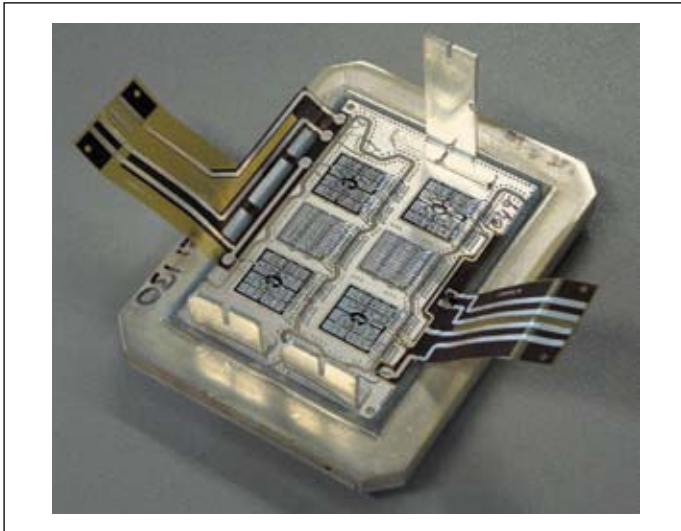


Рис. 3. «Референтный» модуль со сварными алюминиевыми проводниками

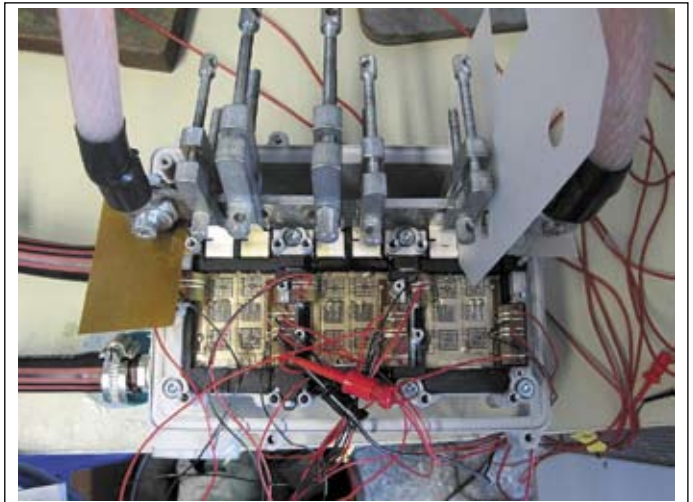


Рис. 4. Тестовый инвертор, используемый для измерения тепловых характеристик модулей SKiN

идентичный по всем остальным элементам конструкции (рис. 3). Подключение каждого кристалла в нем осуществляется с помощью 12 проводников, что обеспечивает оптимальные нагрузочные характеристики. На контактной поверхности диода делается четыре точки сварки на проводник, у IGBT — три точки сварки.

Основная разница указанных способов соединения кристаллов (гибкий SKiN-слой и проводники) состоит в размере контактной поверхности. В то время как общая зона сварки проводников составляет около 21% от активной площади чипа, пленка обеспечивает контакт с 50–85% поверхности кристаллов в зависимости от их типа.

Тепловые характеристики

Максимальное значение мощности P_V , рассеиваемой полупроводниковым элементом, ограничено предельно допустимым перегревом чипов T_p , температурой охлаждающей среды T_a и тепловым сопротивлением кристаллов $R_{th(j-a)}$ в соответствии со следующим выражением:

$$P_V = (T_j - T_a) / R_{th(j-a)}$$

Наиболее сложные тепловые режимы наблюдаются у современных транспортных приводов, работающих при нагреве охлаждающей жидкости до 85 °C и выше. В этом случае допустимая разница температур кристалла и тосола ($T_j - T_a$) оказывается слишком маленькой, и для надежной эксплуатации силовых ключей в таких условиях они должны обладать очень низким термосопротивлением.

Использование SKiN-модулей с высокоэффективным игольчатым радиатором, спеченным с DBC-подложкой, позволяет успешно решить эту задачу. Существенное снижение величины $R_{th(j-a)}$ при этом достигается

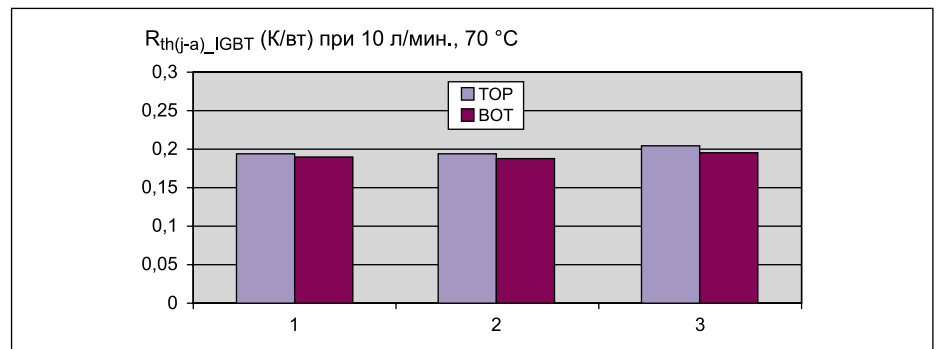


Рис. 5. Тепловое сопротивление $R_{th(j-a)}$ «кристалл — охлаждающая жидкость» для шести ключей тестового инвертора

благодаря отсутствию слоя термопасты, вносящего значительный вклад в общее значение теплового импеданса.

Измерения режимов проводились на макете 3-фазного инвертора (рис. 4) с жидкостным охлаждением (50%-ный раствор гликоля) при температуре тосола 70 °C. Штуцеры для подключения системы охлаждения расположены на левой стороне радиатора, содержащего три параллельных канала циркуляции жидкости для равномерного распределения тепла. Все модули IGBT в тестовой схеме соединены последовательно, их нагрев осуществляется за счет пропускания стабилизированного регулируемого постоянного тока. Подобный испытательный режим позволяет очень точно измерять потери мощности и температуру кристаллов, работающих в одинаковых условиях.

Разница значений тепловых сопротивлений $R_{th(j-a)}$ между верхним (Тор) и нижним (Бот) IGBT-транзистором, так же как и колебания температуры между модулями, не превышает 10% (рис. 5). Нижний ключ полумоста имеет несколько меньшую величину $R_{th(j-a)}$, что объясняется большей площадью DBC-подложки под кристаллами IGBT и, соответственно, лучшим распределением тепла. Этот эффект, свойственный всем си-

ловым модулям, связан с особенностями их топологии.

Результаты измерения тепловых характеристик приведены в таблице 1. Суммарное значение $R_{th(j-a)}$ оказалось рекордно низким для данных условий при малом перепаде давления. Произведение теплового сопротивления на площадь кристаллов $R_{th(j-a)} \times A$ можно рассматривать как интегральный показатель качества силового ключа и использовать для сравнения с лучшими рыночными образцами.

При температуре охлаждающей жидкости 70 °C и скорости потока 10 л/мин максимальный перегрев кристалла 150 °C достигается при удельной плотности мощности (относительно площади кристаллов) 205 Вт/см². У традиционных инверторов, построенных на базе стандартных модулей, устанавливаемых на радиатор через слой

Таблица 1. Тепловое сопротивление «кристалл — окружающая среда» SKiN-модуля для различных условий охлаждения

Скорость потока жидкости, л/мин.	$R_{th(j-a)}$, К/Вт	$R_{th(j-a)} \times A$, К·мм ² /Вт	Перепад давления, мбар
5	0,225	45	30
10	0,194	39	90
15	0,182	36	185

термопасты, этот показатель не превышает 100–150 Вт/см². Необходимо отметить, что значения скорости потока жидкости в таблице 1 даны для трех параллельных каналов охлаждения радиатора. С учетом установки трех модулей IGBT на каждый из них приходится только 1/3 этой величины. Очевидно, что можно организовать и один канал, соединив последовательно трубки в теплосток, но при этом плотность мощности окажется еще выше.

Для корректного сравнения необходимо изучить поведение модулей традиционной конструкции с таким же высокоэффективным радиатором, как и в исследуемом случае. С этой целью проводилось моделирование тепловых режимов, при котором спеченный серебряный слой между DBC-подложкой и радиатором был заменен на слой теплопроводящей пасты толщиной 20 мкм. Отметим, что на практике столь тонкий зазор между подложкой и теплосток применяется только в модулях «безбазового» типа (MiniSKiiP, SKiiP, SKiM), выпускаемых компанией SEMIKRON. Для обычных компонентов с базовой платой номинальная толщина слоя пасты составляет 80–150 мкм. Результаты моделирования подтвердили, что даже при зазоре в 20 мкм тепловое сопротивление стандартных силовых ключей в зависимости от интенсивности охлаждения оказывается выше на 23–30%.

Стойкость к токовой перегрузке

Предельное значение тока диодов измерялось в режиме воздействия стандартного полусинусоидального импульса длительностью 10 мс при температуре 25 °С. Пиковая величина I_{FSM} , достигнутая перед разрушением кристаллов в разных плечах полумоста, приведена в таблице 2. Испытания показали, что использование SKiN-технологии позволяет повысить нагрузочные характеристики диодов примерно на 27% по сравнению со стандартным способом подключения.

Благодаря большей площади поперечного сечения и меньшей длине токопроводящих шин на SKiN-пленке, перегрев контактных зон оказывается гораздо ниже, чем у сварных алюминиевых проводников. Это свойство особен-

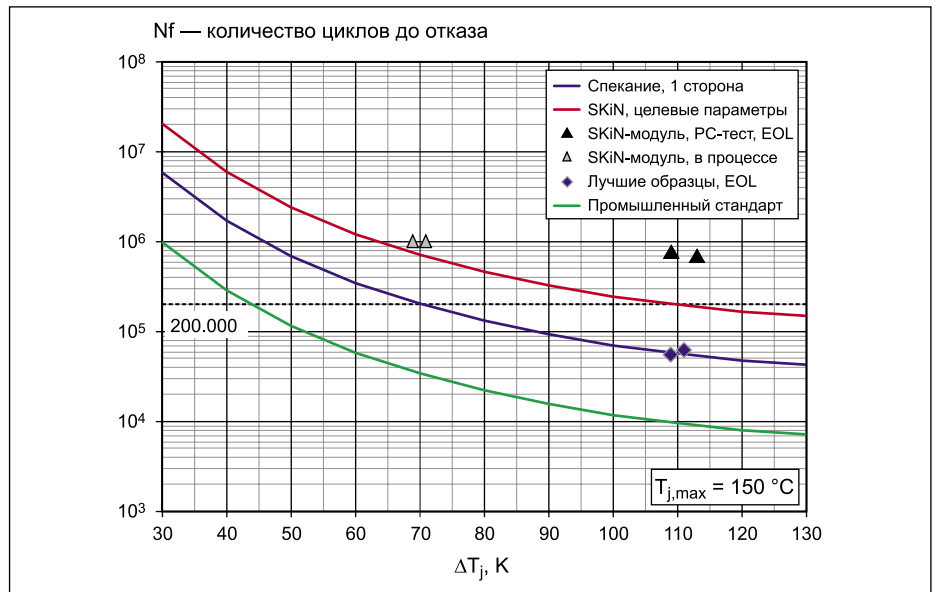


Рис. 6. Результаты испытаний на стойкость к термоциклированию (End Of Life, EOL — тест до отказа)

но важно для таких применений, как активные выпрямители и преобразователи мощных энергетических установок, поскольку оно позволяет компенсировать повышенный нагрев кристаллов. Отметим, что тенденцией развития технологий IGBT является уменьшение размеров чипов, что сопровождается ростом их теплового сопротивления $R_{th(j-a)}$.

Стойкость к термоциклированию

Проверка стойкости к термоциклированию — важнейший этап квалификационных испытаний, по результатам которого можно оценить срок службы модуля в реальных условиях эксплуатации. Термомеханические стрессы, вызванные изменением условий нагрузки, активно сокращают ресурс силовых ключей в таких устройствах, как транспортные приводы и преобразователи ветроэнергетических установок.

Типичным результатом длительного воздействия термоциклов является отрыв проводниковых выводов чипов, а также накопление усталости в паяных соединениях кристаллов и DBC-платы и их разрушение. Любой из этих механизмов может стать доминирующим, что зависит от ряда факторов: длительности цикла, градиента температуры, размера кристалла. Использование технологии спекания чипов, реализованной в ряде серийных модулей SEMIKRON, уже позволило устранить одну из описанных причин отказа, сделав последним «слабым» местом сварное соединение выводов.

Испытания силовых ключей SKiN показали дальнейшее увеличение стойкости к термоциклированию. Тесты на воздействие импульсов мощности проводились на обоих типах модулей при градиенте температуры $\Delta T_j = 110$ К (40...150 °С) и длительности цикла 14 с. Цель исследований состояла в поиске

режима термоциклирования, оказывающего наиболее разрушительное действие на конструкцию модуля и не провоцирующего возникновение эффектов деградации.

Предварительные результаты тестов приведены на рис. 6: для «референтного» модуля они укладываются в ожидаемые рамки (голубая линия), что соответствует 60 000 циклов при $\Delta T_j = 100$ К. Отметим, что стандартные компоненты при тех же условиях выдерживают не более 10 000 циклов (зеленая линия).

Результаты, полученные при испытаниях модулей SKiN, намного превысили расчетные (целевые) значения, показанные на рисунке в виде красной кривой. Параметр N_f у новых силовых ключей составляет 700 000, что во много раз лучше, чем у компонентов классической конструкции. Кроме того, модули SKiN были подвергнуты воздействию малых градиентов температуры $\Delta T_j = 70$ К (80...150 °С), приближенному к рабочим условиям. На момент написания статьи ключи прошли без повреждения 3 млн циклов, испытания будут продолжаться до выхода изделий из строя.

Предварительные тесты показали, что реализация SKiN-концепции в силовых модулях позволяет кардинально улучшить их надежность. В частности, стойкость к термоциклированию превысила показатели лучших промышленных образцов в 70 раз, а по сравнению с новейшими модулями со спеченным соединением кристаллов улучшение оказалось 10-кратным.

При проведении испытаний были использованы 600-вольтовые кристаллы IGBT толщиной 80 мкм с алюминиевой металлизацией поверхности. Для подключения SKiN-пленки на контактные зоны чипов был дополнительно нанесен тонкий слой благородного металла, никаких других доработок не потребовалось.

Таблица 2. Предельное значение тока диода I_{FSM}

SKiN-модуль		«Референтный» модуль	
IGBT	I_{FSM} , А	IGBT	I_{FSM} , А
Top	2666	Top	2096
Bot	2690	Bot	2108
Top	2691	Top	2105
Bot	2662	Bot	2096
Top	2696		
Bot	2662		
Top	2691		
Bot	2656		
Min	2656	Min	2092
Max	2696	Max	2108
Ср.	2677	Ср.	2100
	127%		100%

Заключение

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 (рис. 7). Все связи в SKiN-модулях, включая соединение DBC-подложки с базой или радиатором, а также кристаллов и подложки, осуществляются путем низкотемпературного спекания серебряного нанопорошка. Вместо алюминиевых выводов чипов, подключаемых методом ультразвуковой сварки, используется гибкая металлизированная пленка, интерфейс которой с контактными зонами кристаллов также достигается методом спекания. Это позволяет в четыре раза увеличить активную площадь контакта и, соответственно, улучшить нагрузочные возможности чипов.

Для демонстрации возможностей новой технологии были проведены сравнительные тесты SKiN-модулей и стандартных силовых ключей в инверторном включении. В ходе испытаний в первую очередь исследовались изменения характеристик, связанные с заменой сварных проводниковых выводов чипов на гибкую пленку с токонесущими шинами.

Благодаря улучшению теплового интерфейса силовых кристаллов и использованию высокоэффективного игольчатого радиатора удалось в два раза снизить величину рассеиваемой инвертором мощности. При этом 30% снижения общего значения теплового сопротивления $R_{th(j-a)}$ у модулей SKiN достигнуто за счет замены слоя теплопроводящей пасты на спекаемое соединение.

Модификация геометрии соединений и увеличение контактной поверхности чипов позволило на 27% повысить предельное значение тока оппозитных диодов. Применение SKiN-концепции дало возможность резко повысить стойкость силовых ключей к термодетерiorации относительно стандартных модулей.

Дальнейшие перспективы развития SKiN-технологии связаны с использованием двусторонних гибких пленок. Их применение позволит улучшить отвод тепла от чипов за счет двустороннего охлаждения и обе-

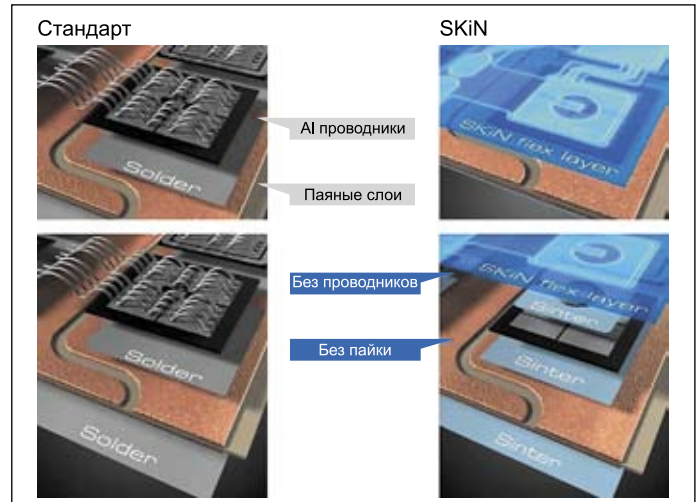


Рис. 7. Концепция SKiN: модули без пайки, сварки и теплопроводящей пасты

спечит возможность установки пассивных и активных компонентов схемы управления затворами, а также датчиков тока и температуры. ■

Литература

1. Грассоф Т. Технологии силовой электроники сегодня и завтра // Силовая электроника. 2011. № 4.
2. Гебл К. Технологии низкотемпературного спекания в силовых модулях // Компоненты и технологии. 2009. № 7.
3. Stockmeier T., Beckedahl P., Göbl C., Malzer T. SKiN: Double side sintering technology for new packages. ISPSD-2011.
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. PCIM-2011.