SKiM63/93 — многоцелевой модуль IGBT SEMIKRON

для транспортного и промышленного привода

Решение задач, связанных с особенностями работы тягового электропривода, требует поиска новых технологий и материалов, совершенствования производственных процессов. Важным этапом на этом пути стало внедрение компанией SEMIKRON технологий прижимного контакта и низкотемпературного спекания [2], что полностью исключило развитие усталостных процессов в паяных и сварных соединениях и обеспечило высокую стойкость к термоциклированию [3]. Практически все новые технологии SEMIKRON нашли применение при создании серии модулей SKiM63/93. Их последняя модернизация — замена алюминиевых проводников медными с алюминиевым покрытием AlCu для подключения контактного слоя чипов — позволила расширить температурный диапазон. Опыт эксплуатации силовых ключей семейства SKiM63/93 подтвердил их высокую надежность в условиях жестких воздействий окружающей среды и циклического изменения нагрузки.

Марко Хонсберг (Marco Honsberg)

Анастасия Шиллер (Anastasia Schiller)

Перевод и комментарии: Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Уникальным элементом конструкции SKiM63/93 (рис. 1 и 2) является ламинированная DC-шина, предоставляющая многоточечный доступ к чипам, установленным на изолирующей подложке. Благодаря минимизации токовых петель удалось достичь очень низкого значения распределенной индуктивности контура коммутации (L_s< 10 нГн). Индивидуальный доступ DC-цепей к каждому кристаллу заметно снижает активное сопротивление силовых терминалов R_{CE} и обеспечивает абсолютную симметрию подключения параллельных IGBT- и FWD-чипов.

Конструктив SKiM63/93 позволяет реализовать скоростные и мощностные характеристики карбидокремниевых чипов, поэтому он используется для производства гибридных модулей (Fast IGBT + SiC Шоттки). Высокоскоростные ключи необходимы, например, в DC/DC-конвертерах станций быстрой зарядки электромобилей (EV).

Расположение сигнальных пружинных выводов в верхней части модуля обеспечивает простое и надежное подключение платы управления, для механической фиксации которой предназначены специальные крепежные стойки. Надежность

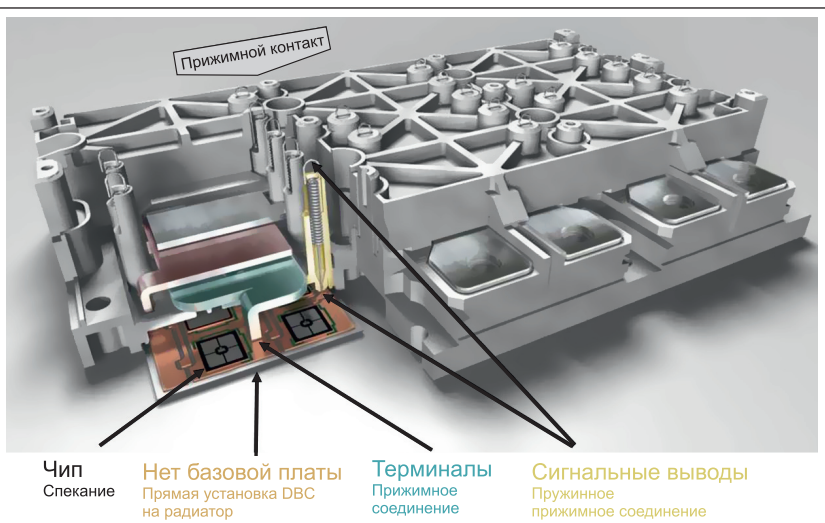


Рис. 1. SKiM63/93 — первые в мире силовые модули, разработанные без применения паяных соединений

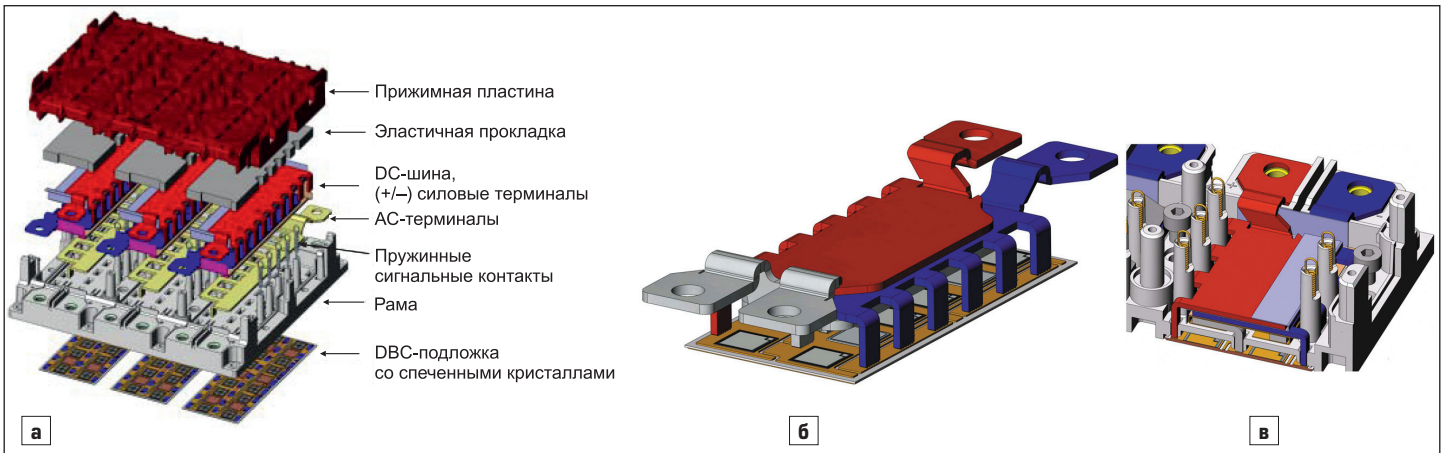


Рис. 2. а) Конструкция модуля SKiM63/93; б) планарная шина и многоточечный доступ к силовым чипам; в) расположение пружинных сигнальных контактов

сигнальных пружинных соединений SEMIKRON подтверждена испытаниями и длительным опытом эксплуатации [3].

Элементы конструкции SKiM можно увидеть на рис. 2, в правой части которого показана низкоиндуктивная DC-шина с многоточечным подключением к силовым кристаллам (рис. 2б), а также расположение сигнальных выводов (рис. 2в). Силовая шина состоит из трех планарных слоев (DC–, DC+, AC), соединенных с изолирующей подложкой Al_2O_3 в зонах, находящихся рядом с чипами. Это позволяет снизить не только статические потери, но и распределенную индуктивность цепей коммутации, а также обеспечить высокую симметрию параллельных ветвей.

Силовые ключи SKiM63/93 предназначены для использования в составе трехфазного тягового электропривода мощностью 60–200 кВт. Для приближения к современным конструкторским стандартам силовые терминалы имеют высоту 17 мм, а размеры корпусов (114×160 и 150×160 мм) и расположение DC- и AC-выводов соответствуют конструктиву Econo+.

Тепловые характеристики

При проектировании модулей SKiM63/93 особое внимание было уделено оптимизации тепловых характеристик. Прижимная конструкция, создающая равномерный контакт керамической DBC-подложки с теплостоком, исключает возникновение так называемого биметаллического эффекта. Отсутствие жестких связей между подложкой и радиатором позволяет снизить толщину слоя термопасты (TIM — Thermal Interface Material) до 20 мкм. Таким образом удается скомпенсировать некоторое ухудшение качества распределения тепла, связанное с отсутствием массивной базовой платы. Напомним, что при установке на теплоотвод стандартных IGBT-модулей рекомендуемая толщина слоя TIM составляет 50–100 мкм. Модули SKiM63/93 поставляются по умолчанию с предварительно нанесенной термопастой. С недавнего времени при заказе можно выбрать не только стандартный (P12), но и новый высокоэффективный материал TIM HPTP (High Performance Thermal Paste).

Конструкция внутренней DC-шины SKiM63/93 обеспечивает определенную степень свободы в позиционировании чипов IGBT и диодов (FWD). Силовые кристаллы расположены таким образом, что тепловые потери равномерно распределяются по изолирующей DBC-подложке. Это позволяет избежать концентрации зон с высокой локальной плотностью потерь. Моделирование мощности, рассеиваемой чипами IGBT и FWD, и результирующего распределения температуры на поверхности керамической подложки демонстрирует отсутствие зон перегрева, что дает возможность повысить мощность инверторной системы при минимальных требованиях к эффективности системы охлаждения.

При установке «безбазовых» модулей SKiM63/93, поставляемых с предварительно нанесенной высокоэффективной термопастой на специализированный жидкостный радиатор (предлагается в качестве опции), исключается дополнительное тепловое сопротивление, вносимое базовой платой. Напомним, что медная или композитная база является обязательным элементом конструкции промышленных силовых модулей. Это обеспечивает предельно высокую плотность мощности, доступную с учетом используемых чипов. Показатели эффективности описанной оптимизированной системы эквивалентны возможностям инверторов на основе модулей с непосредственным охлаждением (pin-fin), используемых главным образом в автомобильной промышленности. При этом исключается риск утечки охлаждающей жидкости, присущий конструкциям с применением pin-fin-модулей IGBT, монтируемых на радиатор с применением специальных уплотнителей.

Варианты исполнения

В настоящее время SEMIKRON выпускает модули SKiM63/93 с рабочим напряжением 650, 1200 и 1700 В. В компонентах платформы используются чипы IGBT/FWD последних поколений, поддерживающие оптимальное соотношение статических и динамических характеристик. Существует несколько вариантов исполнения, что позволяет выбрать силовой ключ в соответствии с конкретными условиями применения. На рис. 3–5 дано сравнение характеристик модулей на основе кремниевых чипов и гибридных силовых ключей (HSiC),

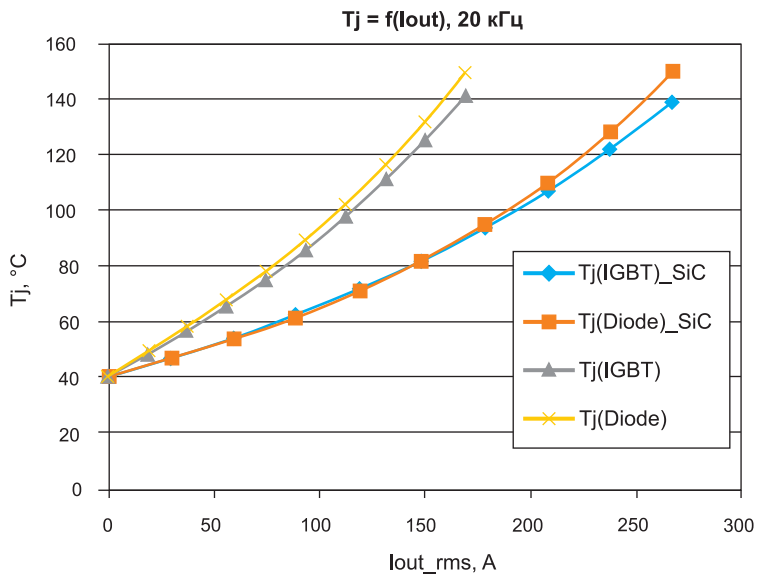


Рис. 3. Зависимость температуры кристаллов IGBT/FWD от тока инвертора для стандартного (Si) и гибридного модуля SKiM93 с SiC-диодами Шоттки

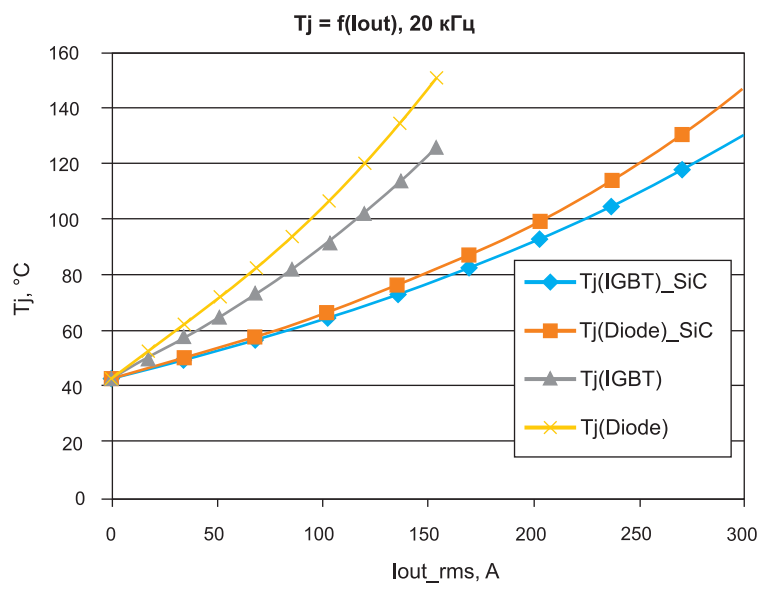


Рис. 4. Зависимость температуры кристаллов от тока инвертора для модуля с оптимизированной топологией чипов FWD при f_{sw} = 20 кГц, V_{DC} = 600 В

представляющих собой сочетание быстрых IGBT- и карбидокремниевых диодов.

На рис. 3 сравниваются тепловые режимы инвертора на основе стандартного модуля SKiM93 с кремниевыми (Si) чипами и гибрида с применением SiC-диодов Шоттки в одинаковых рабочих режимах (f_{sw} = 20 кГц, V_{DC} = 600 В, cos φ = 0,8). Для более жестких условий применения (например, cos φ = –1) улучшение тепловых характеристик SKiM63/93 достигнуто за счет оптимизации топологии расположения кристаллов диодов. Результирующие характеристики при частоте коммутации 20 кГц и V_{DC} = 600 В показаны на рис. 4.

Новые технологии и надежность модулей SKiM63/93

Высокая стойкость к термоциклированию — одно из основных требований, предъявляемых к силовым ключам, работающим в тяговых приводах. Проблема старения паяных слоев, соединяющих базовую плату, DBC-подложку и чипы в стандартных модулях IGBT, достаточно хорошо изучена [8]. Причиной термомеханических стрессов, возникающих при циклическом изменении нагрузки, становится разница коэффициентов теплового расширения (CTE) конструктивных элементов: металлической базы, керамической подложки и полупроводниковых кристаллов. С течением времени происходит накопление усталости и ухудшение тепловых характеристик промежуточных связей. В первую очередь это относится к паяным соединениям, традиционно используемым в промышленных модулях. В компонентах семейства SKiM63/93, не имеющих базовой платы, данный механизм отказа практически полностью исключен.

Почти все технологии силовой электроники, разработанные SEMIKRON для повышения надежности, применяются в компонентах платформы SKiM63/93. Например, внедренный SEMIKRON более 10 лет назад процесс низкотемпературного спекания [2] имеет огромный потенциал для повышения надежности соединительного слоя кристаллов. В большинстве IGBT-модулей с подложкой из оксида алюминия (Al_2O_3) отслоение чипов является одной из основных причин преждевременного выхода модуля из строя.

Тепловое сопротивление контактного слоя, состоящего из спеченного серебра, гораздо ниже, чем у паяного соединения. Стабильный и надежный механический и тепловой контакт обеспечивается благодаря высокой температуре плавления Ag (+960 °C, что намного выше, чем у любых используемых в промышленности припоев), низкой пористости и высокой равномерности порошковой структуры. В таком материале не развиваются усталостные процессы, что позволяет получить хорошую стойкость к термоциклированию и увеличить срок службы силовых ключей.

Благодаря уникальным технологическим свойствам паста из наночастиц Ag может успешно заменить традиционные мягкие и жесткие припои. Ее использование устраняет производственные этапы, необходимые для адаптации свойств припоя и технологии пайки к конкретным типам чипов и подложек. Поскольку контактная область состоит практически из чистого серебра, она имеет гораздо лучшую электро- и теплопроводность, нежели любой другой материал, данная технология пригодна для всех типов кристаллов и керамик.

Даже в предельных режимах качество и надежность спеченного слоя намного выше, чем у паяного соединения, поскольку серебряная паста (в отличие от припоя) работает при температурах, гораздо меньших точки плавления. Применение новой технологии позволяет повысить рабочую температуру до +300 °C, что делает процесс спекания наиболее перспективным для монтажа новых широкозонных полупроводников, в первую очередь SiC.

Как видно на рис. 5, использование технологии спекания позволяет повысить стойкость к термоциклированию при градиенте температуры ΔT_j = 80 K примерно в шесть раз. Благодаря этому модули SKiM63/93 являются оптимальным выбором для применения в мощных промышленных приводах, тяговых инверторах электромобилей (EV), а также в преобразователях для альтернативной энергетики.

Повышение надежности силовых полупроводниковых модулей требует от производителей элементной базы дальнейшего рас-

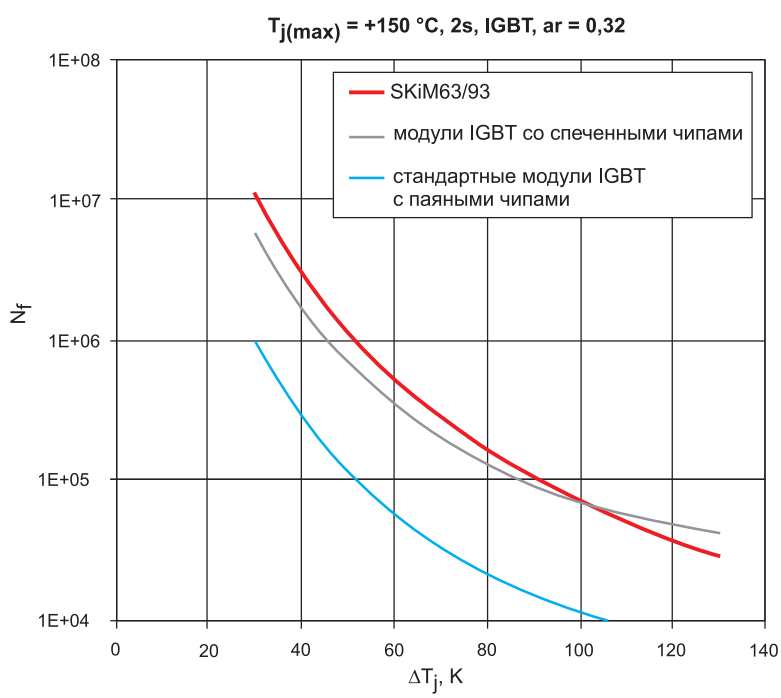


Рис. 5. Зависимость количества термоциклов до отказа N_f от градиента температуры ΔT_j. Условия проведения теста: T_{jmax} = +150 °C, длительность цикла 2 с, характеристическое соотношение проводника 0,32

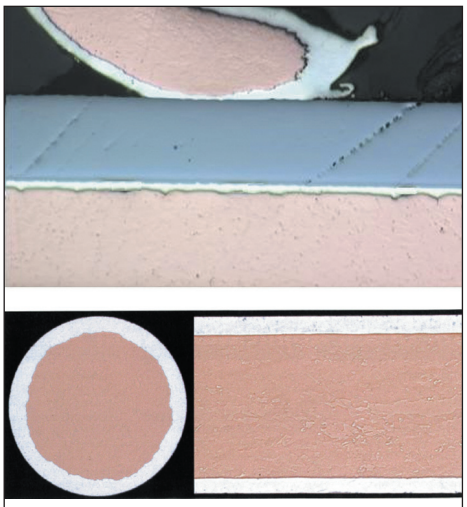


Рис. 6. Поперечное и продольное сечение медного алюминизированного (AlCu) проводника

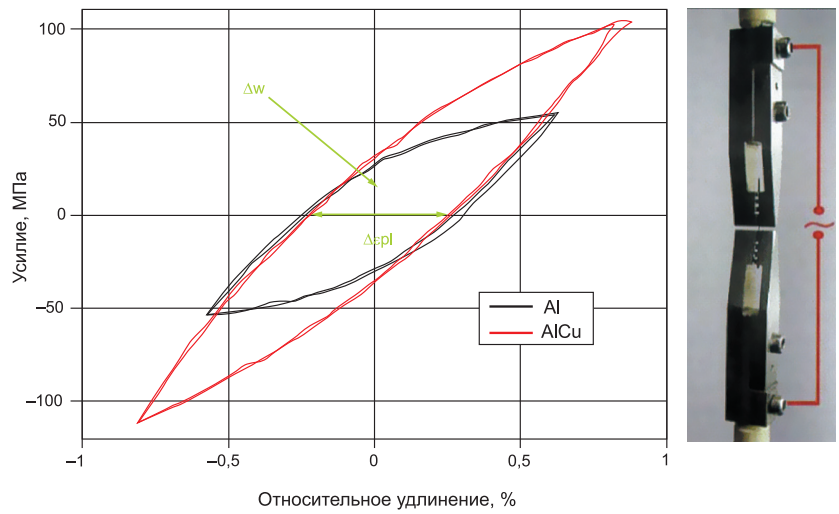


Рис. 7. Слева: измерение характеристик деформации Al– и AlCu–проводников; справа: оборудование для тестирования соосности, образец провода располагается между фиксаторами

ширения диапазона рабочих температур, что обусловлено тремя основными факторами:

- высокая температура охлаждающей жидкости в гибридных и электрических транспортных средствах;
- перспективы применения компонентов с широкой запрещенной зоной (например, SiC);
- повышение токонесущей способности кремниевых кристаллов при работе с температурой перехода до +200 °C.

С начала XXI века этой проблемой занимаются все ведущие производители силовой элементной базы. Ее решение требует значительного увеличения срока службы конструктива модуля, все материалы и соединения которого должны быть рассчитаны на надежную и долговременную работу в жестких условиях эксплуатации. В зависимости от конкретных режимов функционирования и выбранной ресурсной модели в общем случае повышение температуры чипов на каждые 25 °C требует пятикратного увеличения показателей надежности. Соответственно, для расширения диапазона рабочих температур со +150 до +200 °C ресурс силового модуля должен быть повышен в 25 раз!

Одним из барьеров на пути повышения надежности силовых ключей в условиях повышенных температур становятся алюминиевые проводники и их сварные соединения, традиционно используемые для подключения контактной поверхности чипов. Решением данной проблемы много лет занимается компания HERAEUS — основной поставщик материалов для производства проводниковых выводов. С начала 1980-х годов специалисты фирмы анализируют возможность применения композитов, в материалах 2007 года [5] отмечено, что стойкость к термоциклированию может быть заметно увеличена при использовании ленточных выводов из алюминизированной меди (AlCu). Данный факт привлек пристальное внимание производителей силовой элементной базы, в результате чего HERAEUS начал работы по улучшению свойств композитных проводников с круглым профилем.

Поперечное и продольное сечение AlCu-провода диаметром 300 мкм показано на рис. 6. Толщина алюминиевого покрытия составляет 25–35 мкм при диаметре медного «ядра» 230–250 мкм, объемное содержание Cu при этом находится в диапазоне 50–70%. Столь высокая медная фракция требует точной «настройки» механических свойств проводников для каждого конкретного применения.

Характеристики композита AlCu оптимизированы для ультразвуковой сварки — благодаря мягкому алюминиевому покрытию при формировании контактных площадок снижается риск повреждения кристалла.

Воздействие асимметричной механической циклической нагрузки позволяет выявить разницу свойств обычных (Al) и композитных (AlCu) выводов. С этой целью отрезок проводника длиной несколько миллиметров закрепляется в специальном приспособлении и подвергается периодической нагрузке при определенном уровне пластической деформации. Для оценки результатов используется два критерия: фиксированное относительное удлинение и фиксированная рассеянная энергия.

На рис. 7 относительное удлинение показано по оси X, при этом значение энергии становится интегралом удлинения по величине приложенного усилия, соответствующего площади петли гистерезиса. Одним из

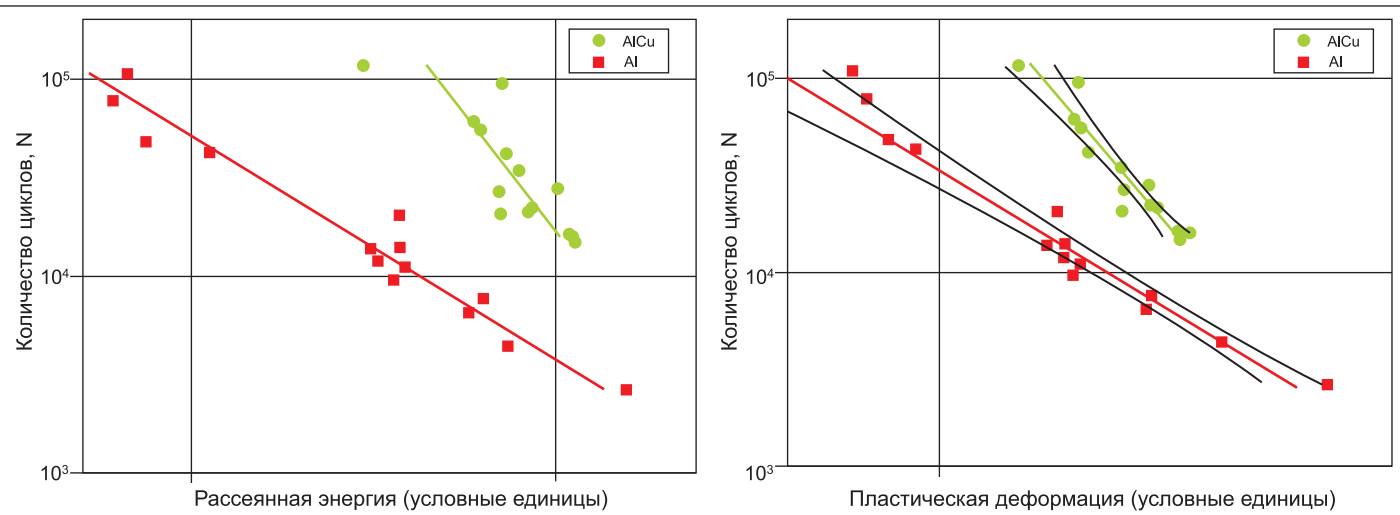


Рис. 8. Справа: кривая усталости алюминиевого и медного алюминизированного проводника (тип B) для пластической деформации; слева: для рассеянной энергии

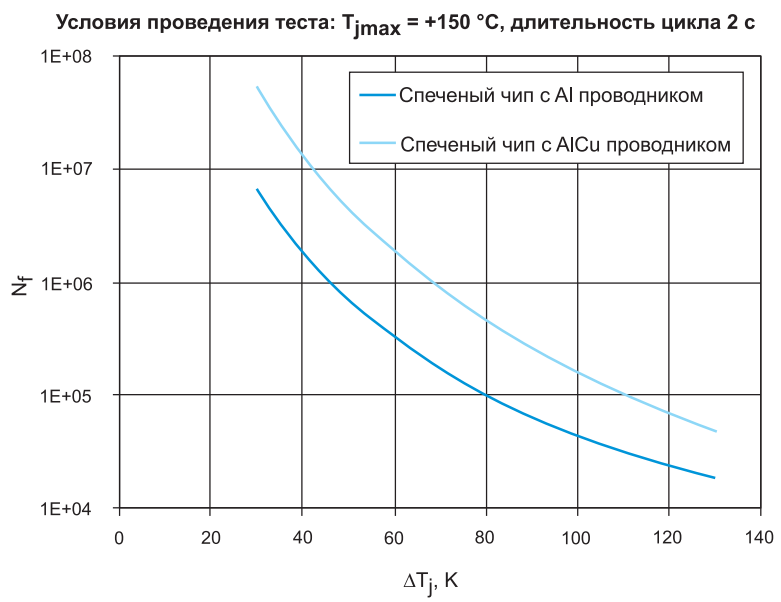


Рис. 9. Зависимость количества термоциклов до отказа N_f от градиента температуры ΔT_j для спеченных чипов с проводниками Al и AlCu. Условия проведения теста: T_{jmax} = +150 °C, длительность цикла 2 с

параметров, характеризующих свойства тестируемых материалов, является большая величина усилия, необходимого для аналогичного удлинения алюминизированного медного проводника.

Зависимость количества механических циклов, приводящих к отказу при определенном уровне нагрузки, формирует кривую усталости, показанную на рис. 8. Полученные результаты подтверждают тот факт, что вывод AlCu способен выдерживать большее количество механических стрессов до начала его разрушения, чем проводник из чистого алюминия.

Технология AlCu используется в модулях семейства SKiM 63/93, предназначенных для систем, работающих с большими циклическими изменениями нагрузки (например, транспортный привод). Применение AlCu-проводников при тщательном выборе параметров сварки позволяет примерно в четыре раза повысить стойкость к активному термоциклированию при ΔT = 80 K, как показано на рис. 9.

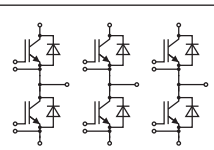
Компоненты семейства SKiM63/93 и устройства управления

На рис. 10 приведены типы выпускаемых модулей SKiM63/93 и их основные особенности. Силовые ключи имеют три класса напряжения (650, 1200 и 1700 В), исполнения для особо тяжелых условий эксплуатации отличаются применением технологии спекания чипов (Sintered) и способом подключения контактных поверхностей чипов (AlCu).

На рис. 11 показаны два варианта плат адаптеров, предназначенных для управления модулями SKiM63/SKiM93, в трехфазной и полумостовой конфигурации. Адаптер фиксируется на опорных пластиковых стойках корпуса с помощью винтов, что обеспечивает надежное электрическое соединение между пружинными выводами модуля и контактными площадками печатной платы (PCB). Стандартные драйверы IGBT (SKYPER 42LJ, SKYPER 42) устанавливаются в разъемы на PCB, где также предусмотрено монтажное пространство для монтажа резисторов затворов. В первом варианте (трехфазный инвертор — рис. 11а) на плате адаптера установлено три цифровых драйвера SKYPER42 LJ.

Второй вариант адаптера с мощным драйвером SKYPER 42 (рис. 11б) предназначен для объединения затворов трех полумостовых элементов модуля SKiM63/93 и формирования полумостовой конфигурации с номинальным током, в три раза превышающим номинальное значение I_C. В таком исполнении компоненты семейства SKiM являются хорошей альтернативой ключам в конструктиве PrimePack, заметно превосходя их по стойкости к термоциклированию.

В обоих вариантах платы управления обеспечивают все необходимые функции безопасности: динамическую защиту от КЗ (DSCP) по напряжению насыщения IGBT, защиту от падения напряжения (UVLO) и от перегрева (OT). Отключение силового каскада при критическом повышении температуры осуществляется по сигналу термодатчика PTC, входящего в состав модуля SKiM63/93. Кроме того, плата адаптера формирует дифференциальный выходной сигнал, пропорциональный V_{DC}, который может быть использован для блокировки силового каскада при перенапряжении.



	650 В	1200 В	1700 В
SKiM 63	600 A SKiM606GD07 - спекание - пайка	300 A SKiM306GD12 - спекание - пайка	280 A SKiM286GD17 - спекание - AlCu выводы чипов диодов
SKiM 93	900 A SKiM909GD07 - спекание - пайка	450 A SKiM459GD12 - спекание - пайка - SiC - AlCu выводы чипов диодов	420 A SKiM429GD17 - спекание - AlCu выводы чипов диодов

Рис. 10. Типы модулей SKiM63/93 и их основные особенности

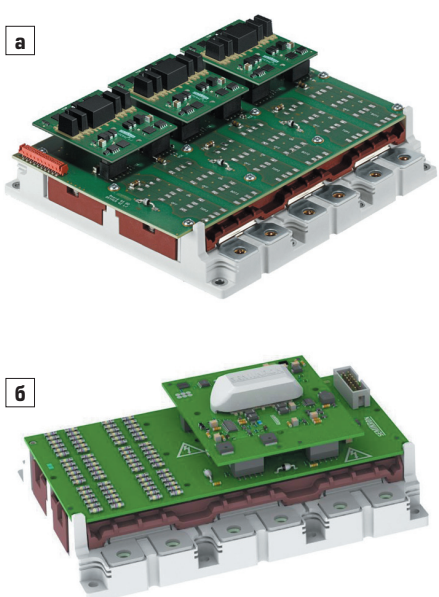


Рис. 11. а) Адаптерная плата Board 63/93 GD SKYPER 42LJR с тремя драйверами SKYPER 42LJ; б) адаптерная плата с драйвером SKYPER 42 для формирования полумостовой конфигурации модуля (оба адаптера доступны для SKiM63 и SKiM93)

Заключение

К электронным устройствам, предназначенным для работы в транспортном средстве с электрическим или гибридным приводом, предъявляются особо жесткие требования. Они должны быть легкими, компактными и в то же время способными работать в условиях экстремальных климатических и механических воздействий.

В гибридных автомобилях новейших поколений используется одноконтурная система охлаждения, температура тосола в которой поддерживается на уровне +105 °C в номинальном режиме и достигает +120 °C при кратковременных перегрузках. Окружающий воздух в подкапотном пространстве может нагреваться до +125 °C, а температура чипов T_j силового модуля способна превысить значение +150 °C. Однако во время зимней стоянки кристаллы могут остывать до температур, близких к точке замерзания охлаждающей жидкости. Применение стандартных силовых модулей в условиях воздействия термоциклов со столь высоким градиентом неизбежно ведет к ранним отказам.

В конструкции модулей серии SKiM63/93 воплотился 15-летний опыт производства компонентов на основе прижимной технологии SEMIKRON. Благодаря отсутствию базовой несущей платы и использованию технологии спекания устраняются основные причины отказов силовых ключей, возникающих под воздействием термомеханических стрессов.

Силовая многослойная шина модулей SKiM63/93 отличается низкой распределенной индуктивностью (L_{CE}< 10 нГн) и омическим сопротивлением ($R_{CC'+EE'}$ ≤ 0,3 мОм), что обеспечивает снижение уровня потерь и коммутационных перенапряжений. С учетом предельной температуры кристаллов +175 °C силовые ключи данного типа способны надежно работать в транспортных средствах с одноконтурной системой жидкостного охлаждения. Также в конструктиве SKiM93 выпускаются гибридные модули с антипараллельными SiC-диодами Шоттки.

Внедрение технологии низкотемпературного спекания для установки силовых чипов позволило в пять раз повысить стойкость к термоциклированию и полностью исключить использование пайки. Компоненты семейства SKiM63/93 удовлетворяют самым жестким требованиям по климатическим и механическим воздействиям, предъявляемым к современным тяговым приводам электро- и гибридомобилей.

Литература

1. Материалы сайта www.semikron.com
2. Колпаков А. Технология низкотемпературного спекания в силовых модулях // Новые технологии. 2009. № 7.
3. Колпаков А. Термоциклы и термоциклирование // Силовая электроника. 2006. № 2.
4. Колпаков А. Надежность прижимных соединений силовых модулей в условиях агрессивных сред // Силовая электроника. 2006. № 4.
5. Luechinger C., Loh T.-K., Oftebro K., Wong G. Composite Aluminum-Copper Ribbon bonding — Heel Reliability. Proc. IMAPS, 2007.
6. Scheuermann U., Beckedahl P. The Road to the Next Generation Power Module — 100% Solder Free Design. Proc. CIPS, 2008.
7. Ramminger S., Seliger N., Wachutka G. Reliability Model for Al Wire Bonds Subjected to Heel Crack Failures // Microelectronics Reliability. 2000. Vol. 40. Iss. 8–10.
8. Scheuermann U., Schmidt R. Impact of Solder Fatigue on Module Lifetime in Power Cycling Tests. Proc. EPE, 2011.