

Многослойная SKiN-технология:

прорыв в «третье измерение» силовой электроники

Способы корпусирования силовых модулей в настоящее время претерпевают серьезные изменения. В первую очередь этому способствует разработка таких инновационных процессов, как диффузионное спекание серебра и ультразвуковая сварка в жидкой фазе, а также использование гибких полимерных пленок для установки кристаллов (SKiN-технология) [1]. Внедрение новых технологий обусловлено потребностью в повышении плотности мощности, улучшении показателей надежности и снижении стоимости.

Рост популярности широкозонных полупроводниковых приборов требует поиска конструктивов, имеющих предельно малую индуктивность и способных работать в широком диапазоне температур [2]. Использование двухслойных гибких SKiN-пленок для установки силовых кристаллов открывает широкие возможности проектирования силовых модулей со сверхнизким значением распределенной индуктивности коммутации. В данной статье представлена новая конструктивная концепция, позволяющая на 50% увеличить плотность мощности и на 60% снизить значение внутренних паразитных элементов по отношению к показателям лучших промышленных образцов.

Питер Беккдаль
(Peter Beckedahl)

Матиас Спанг
(Matthias Spang)

Оливер Тамм
(Oliver Tamm)

Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Гибкая пленка и технология спекания

Концепция промежуточных соединений с помощью гибкой полимерной пленки (SKiN) впервые была представлена компанией SEMIKRON в 2011 г. [3]. При использовании данной технологии все паяные (кристаллы с подложкой, подложка с базовой платой) и сварные (выводы кристаллов с DBC-платой) соединения в силовом модуле заменяются диффузионным спеканием серебра. На рис. 1 показано поперечное сечение SKiN-модуля. Вместо алюминиевых проводников, традиционно подключаемых к металлизации верхней части чипов с помощью

ультразвуковой сварки, контактные площадки силовых кристаллов соединены медными шинами, нанесенными на полимерную пленку методом диффузионного напыления.

По сути SKiN-пленка представляет собой двухслойную гибкую печатную плату. На нижнем слое расположены медные трассы, отвечающие за высокоточные соединения, верхний слой содержит дорожки для подключения управляющих цепей, выводов питания схемы управления и датчиков. В то время как общая контактная зона сварных проводников составляет только около 20% от площади металлизации чипов, область электрической связи спеченного соединения

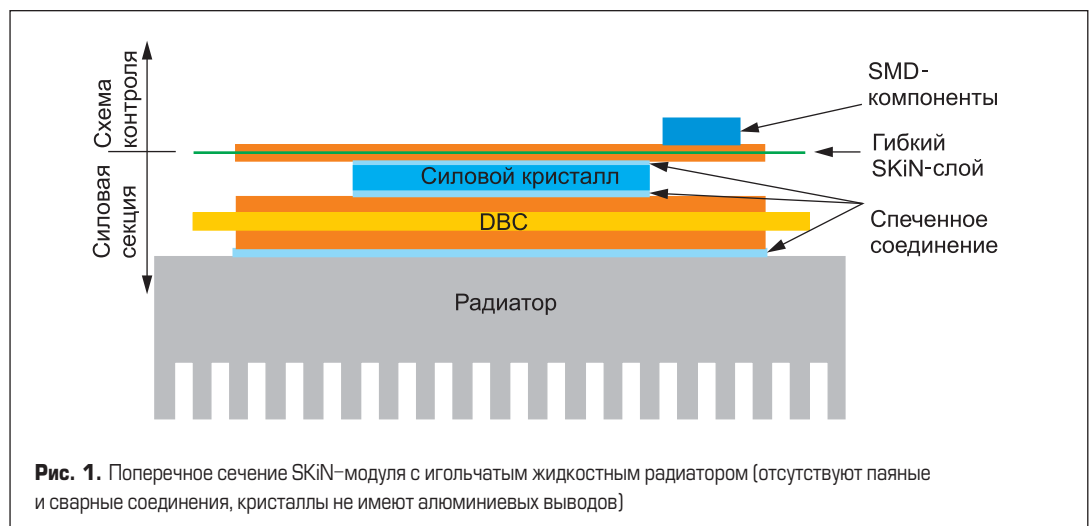


Рис. 1. Поперечное сечение SKiN-модуля с игольчатым жидкостным радиатором (отсутствуют паяные и сварные соединения, кристаллы не имеют алюминиевых выводов)

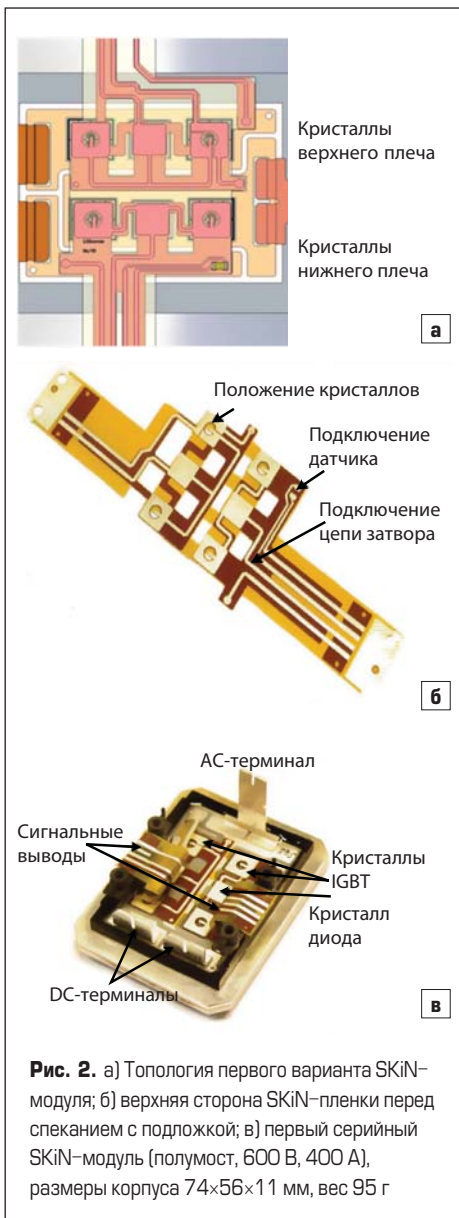


Рис. 2. а) Топология первого варианта SKiN-модуля; б) верхняя сторона SKiN-пленки перед спеканием с подложкой; в) первый серийный SKiN-модуль (полумост, 600 В, 400 А), размеры корпуса 74×56×11 мм, вес 95 г

гибкой пленки достигает 85%. Увеличение площади контакта и наличие толстого слоя металлизации (примерно равного диаметру алюминиевых проводников) способствуют улучшению распределения тепла, повышению перегрузочной способности и стойкости к термомоциклированию [4, 5].

Концепция 3D SKiN

В первом варианте SKiN-модуля двухслойная пленка была использована для замены проводниковых подключений выводов чипов, однако при этом сохранился традиционный способ их установки. Силовые кристаллы располагаются в два ряда по направлению от DC- к AC-терминалам, на керамической изолирующей DBC-подложке находятся три токнесущие трассы (рис. 2а). Коллектор IGBT верхнего плеча (основание чипа) спекается с трассой DC(+), коллектор IGBT нижнего плеча таким же образом подключается к шине AC, дорожка DC(-) размещена по краю DBC-платы. Нижний слой SKiN-пленки служит для соединения эмиттеров IGBT (поверхность чипа) с близлежащими трассами AC или

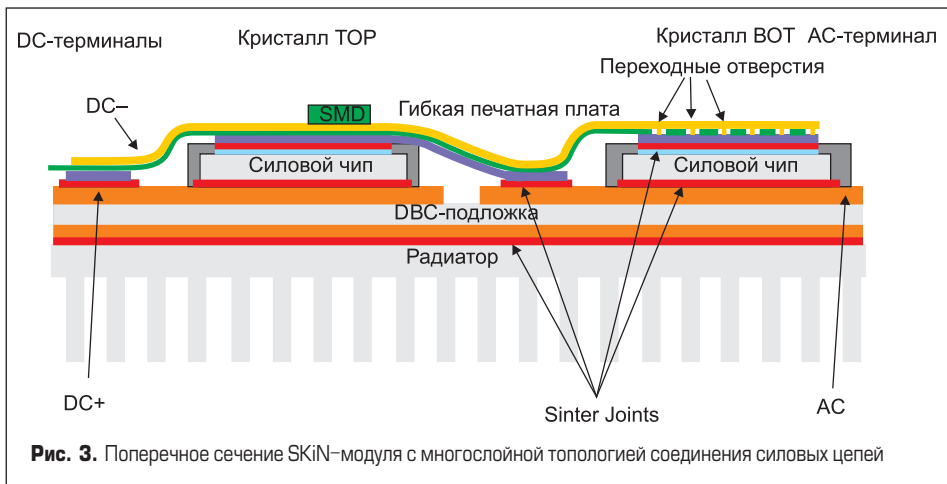


Рис. 3. Поперечное сечение SKiN-модуля с многослойной топологией соединения силовых цепей

DC(-) на подложке. На верхнем слое производится разводка цепей управления (затворы IGBT) и сигналов датчиков.

За счет широкого и низкого профиля силовых трасс на SKiN-пленке удалось примерно на 2 нГн снизить паразитную индуктивность цепей коммутации по сравнению с эталонным IGBT-модулем стандарта 62 мм [4, 5]. Как показано на рис. 3, использование 3D-концепции позволило задействовать верхний слой пленки для трассировки силовых цепей. Переход от обычной «плоской» топологии к «третьему измерению» значительно расширяет возможности проектирования структуры модуля. Для формирования полумостовой конфигурации кристаллы больше не нужно размещать в традиционном положении, т. е. «бок о бок» по направлению от DC- к AC-терминалу.

Новая 3D-концепция допускает топологию размещения компонентов, при которой все чипы нижнего плеча (BOT) устанавливаются рядом с AC-выводом, а кристаллы TOP располагаются у DC-терминалов. В такой конфигурации нижний слой гибкой пленки (фиолетовый) используется только для подключения эмиттера TOP IGBT к AC-шине на DBC-подложке. По верхнему слою (желтый) проходит трасса DC(-) от DC-терминала через кристаллы верхнего плеча (TOP) к выводам эмиттеров чипов нижнего плеча (BOT). Все силовоточные соединения верхнего и нижнего слоев гибкой платы выполняются через массив переходных отверстий. Данная конструктивная концепция обеспечивает ряд существенных преимуществ, перечисленных ниже.

Повышение плотности тока

Благодаря тому что шина DC(-) расположена на верхнем слое гибкой платы, «виртуально» отпадает необходимость в сложной трассировке DBC-подложки. На ней достаточно разместить только две большие прямоугольные дорожки DC и AC, на которые устанавливаются силовые кристаллы. Для подключения к силовой шине требуется только небольшая дополнительная трасса DC(-) в нижнем левом углу подложки (рис. 7).

Наличие дополнительного пространства и простота расположения чипов позволили увеличить плотность мощности на 50%.

Вместо двух параллельных (2×100 мм²) IGBT (400 А, 650 В) в новой топологии предусмотрена установка трех более мощных кристаллов (600 А, 650 В) на такой же DBC-подложке размером 59×42 мм (рис. 4). Также изменена схема подключения диодов: вместо одного большого кристалла (120 мм²), находящегося в центре между двумя транзисторами, установлено три чипа меньшего размера (53 мм²) непосредственно перед каждым IGBT, что обеспечивает полностью симметричную цепь коммутации.

Еще одним изменением, позволившим поднять плотность мощности, стала оптимизация размещения выводов управления затворами. В новой разработке использованы пружинные контакты, хорошо известные по популярному семейству модулей SEMIKRON MiniSKiP. Впервые пружинные подключения сигналов управления затворами и выходов датчиков выполнены непосредственно на верхних поверхностях силовых кристаллов. Гибкая плата и промежуточные спеченные слои защищают чипы от воздействия сил сжатия пружин и так называемой «фреттинг-коррозии», возникающей в результате трения сопрягающихся поверхностей. Контактные площадки цепей подключения затворов можно увидеть на рис. 4 (расположены посередине), выводы датчика

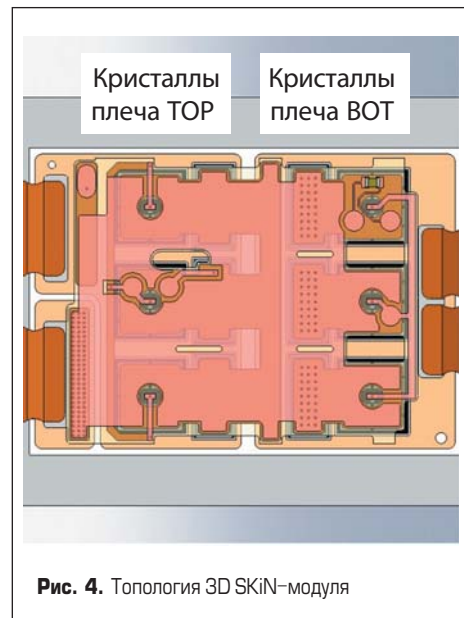


Рис. 4. Топология 3D SKiN-модуля

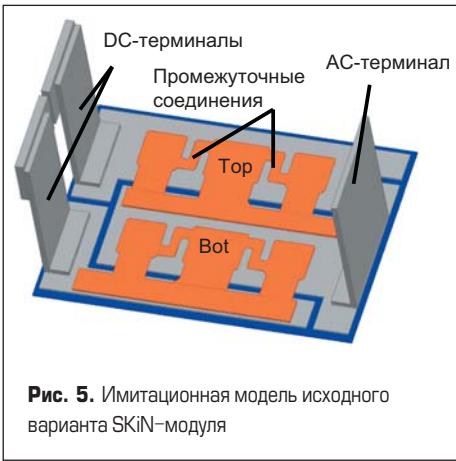


Рис. 5. Имитационная модель исходного варианта SKiN-модуля

температуры размещаются в верхнем правом углу, непосредственно на чипе BOT IGBT.

Перемещение основных цепей с изолирующей керамической подложки на слой гибкой платы дает гораздо больше свободы и гибкости при проектировании конструкции модулей. Многослойная плата имеет свои собственные возможности маршрутизации трасс, не конкурирующие с топологией силовых шин на подложке, что позволяет разрабатывать множество вариантов модулей с гораздо более плотной упаковкой, используя DBC-платы стандартных размеров.

Снижение паразитных индуктивностей

В [4] приведены сравнения результатов измерений коммутационных индуктивностей L_s полумостового модуля со стандартным проводниковым способом подключения кристаллов и модуля, выполненного по SKiN-технологии. Величина L_s во втором случае примерно на 2 нГн ниже, чем в первом.

В целях получения более подробной информации о распределенных параметрах исследуемого силового модуля питания было проведено моделирование с помощью программного пакета ANSYS Q3D Extractor. Для учета коротких переходных процессов нарастания и спада тока при коммутации использовалось AC решающее устройство.

Имитационная модель для расчета распределенной индуктивности первого варианта

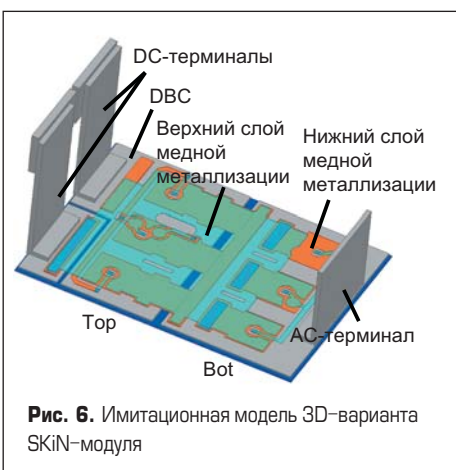


Рис. 6. Имитационная модель 3D-варианта SKiN-модуля

Таблица 1. Сравнение коммутационных индуктивностей [нГн] различных вариантов SKiN-модуля

Тип модуля	TOP IGBT	BOT IGBT
Модуль с проводниковым подключением чипов	19,29	19,16
Первый SKiN-модуль без промежуточных соединений	18,57	18,27
Первый SKiN-модуль	17,67	17,61
Первый SKiN-модуль без DC-терминалов	3,48	3,44

модуля SKiN показана на рис. 5. Цепь коммутации включает в себя DC-терминалы и токовые шины, проходящие по DBC-подложке и гибкой плате. В предложенной модели на SKiN-пленке имеются промежуточные соединения между параллельными чипами. Поскольку ток нагрузки передается только по нижнему слою металлизации пленки, верхний слой, предназначенный для подключения цепей затворов, в данную модель не включен.

В таблице 1 приведены результаты моделирования индуктивностей для нескольких исполнений первого варианта SKiN-модуля. Поскольку каждое плечо полумоста содержит два кристалла IGBT и один диод, рассматриваются два пути коммутации для верхнего и нижнего ключа соответственно. Значения, приведенные в таблице 1, представляют собой средние значения, рассчитанные для этих двух цепей.

Модуль с проводниковым способом подключения чипов имеет такую же DBC-подложку и топологию расположения кристаллов, как и SKiN-ключ на рис. 2, однако гибкая пленка в нем заменена соединительными проводами. Верхняя контактная поверхность каждого IGBT и диода подключена к шинам на DBC-подложке посредством 12 сварных проводников диаметром 300 мкм. Во второй строке таблицы вместо них используется SKiN-пленка, а промежуточные связи, отмеченные на рисунке 5, здесь опущены.

Данная модель является переходной между стандартным модулем и первым вариантом SKiN, поскольку промежуточные соединения отсутствуют и в модуле традиционной конструкции. Моделирование позволяет провести более глубокий анализ влияния конструктивных модификаций на величину распределенной индуктивности. Ее снижение на 0,72 нГн для верхнего и на 0,89 нГн для нижнего ключа достигается благодаря замене проводниковых соединений на гибкую пленку.

Модуль SKiN в третьей строке таблицы соответствует рис. 5, на котором показаны промежуточные подключения. В этом случае моделирование дает на 1,62 нГн (верхнее плечо) или на 1,55 нГн (нижнее плечо) меньшую индуктивность по сравнению с вариантом с проводниковым подключением кристаллов, эта разница близка к измеренной (2 нГн).

Чтобы оценить вклад DC-терминалов в общую величину L_s , было проведено моделирование конструкции без учета выводов постоянного тока. В этом случае только 3,48 нГн приходится на IGBT верхнего плеча и 3,44 нГн на BOT IGBT. Сравнение этих значений для полного варианта модуля SKiN показывает, что «взнос» DC-терминалов в общую величину

коммутационной индуктивности составляет около 14,2 нГн.

Согласно представленным результатам моделирования, снижение величины L_s на 1,6 нГн стало возможным благодаря замене проводников на гибкую многослойную плату. Частично это обусловлено близким размещением (расстояние <1 мм) гибкой платы и DBC-подложки. Наличие промежуточных связей приводит к дальнейшему уменьшению коммутационной индуктивности за счет параллельного положения токовых трасс. Кроме того, моделирование четко показало, что большая часть L_s приходится на DC-терминалы.

На следующем этапе изучалась 3D-топология (рис. 6), в которой медные слои на SKiN-пленке служат проводниками тока нагрузки. Данный модуль содержит три кристалла IGBT и три диода на каждое плечо. Средние значения паразитных индуктивностей без учета выводов постоянного тока приведены в таблице 2, здесь используются такие же DC-терминалы, как и в предыдущем случае. Сравнение с результатами, приведенными в таблице 1, показывает, что коммутационная индуктивность у такого варианта топологии несколько меньше. Особенно это заметно, если рассматривать только внутренний контур коммутации, исключая DC-терминалы, снижение в данном случае составляет от 3,5 до 1,3 нГн, т. е. более чем на 60%.

Индуктивность внутреннего контура мала, поскольку трассы DC(+), DC(-) и AC проложены одна над другой. Большое влияние на распределенные параметры оказывает толщина изолирующей пленки между верхним и нижним слоем меди, которая составляет менее 50 мкм. Как и раньше, наибольший вклад в общее значение L_s вносят DC-терминалы, формирующие довольно большую токовую петлю. Очевидно, что для дальнейшего снижения распределенных параметров необходимо сосредоточиться на оптимизации топологии шин питания.

Токонесущая способность и вопросы охлаждения

Как показано выше, 3D SKiN-дизайн имеет широкие возможности по повышению плотности мощности и снижению паразитных индуктивностей. Однако трассировка сило-

Таблица 2. Коммутационные индуктивности [нГн] различных вариантов 3D-модуля с силовыми трассами на обеих сторонах SKiN-пленки

Тип модуля	TOP IGBT	BOT IGBT
3D SKiN-модуль	16,05	16,25
3D SKiN-модуль без DC-терминалов	1,19	1,39

вых шин на тонкой полимерной пленке для модуля с номинальным током 600 А является достаточно сложной задачей. Технология 3D SKiN предусматривает использование нескольких сегментов конструкции для передачи тока:

- проводящий слой на DBC-подложке;
- проводящий слой на SKiN-пленке;
- соединения металлизации слоев через массив переходных отверстий;
- терминалы.

В стандартных модулях токопроводящие трассы выполняются путем нанесения медной металлизации на изолирующую DBC-подложку. Благодаря низкому сопротивлению меди активные потери очень малы и тепло от проводников эффективно отводится через керамику на радиатор. Однако 3D SKiN-технология обладает лучшими возможностями по охлаждению за счет более широких ресурсов трассировки (рис. 7). Часть токонесущих цепей в этом случае перемещается с DBC-платы на гибкую SKiN-пленку, соответственно, площадь сечения силовых трасс на изолирующей подложке становится намного выше. Соответственно снижаются активные потери (табл. 3) и улучшаются условия распространения тепла.

Благодаря простой структуре медных слоев значительно уменьшается количество краевых поверхностей в сравнении с традиционным способом подключения кристаллов и увеличивается механическая стабильность конструкции, она становится более устойчивой к термомеханическим стрессам.

Плотность тока в медных дорожках на гибкой пленке немного ниже, чем в алюминиевых проводниках, традиционно применяемых для соединения кристаллов. В то время как их токонесущая способность резко падает с увеличением длины из-за ограниченной возможностей охлаждения, трассы любой протяженности на SKiN-пленке способны проводить высокие токи за счет более эффективного отвода тепла. Кроме того, электропроводность меди на 60% выше, чем алюминия.

Благодаря низкому удельному сопротивлению и возможности эффективного охлаждения медных дорожек через элементы конструкции, SKiN-модули обладают гораздо лучшими тепловыми характеристиками. Этому способствует и применение метода низкотемпературного спекания для подключения нижней и верхней контактной поверхностей чипов, а также соединения силовых терминалов и SKiN-пленки с DBC-подложкой. За счет большой площади сечения (до 85% контактной поверхности чипа) и малой тол-



Рис. 7. Топология трасс DBC-подложки 3D SKiN-модуля

щины (несколько микрометров) спеченного соединения существенно снижается активное сопротивление и, соответственно, мощность рассеивания, что очень важно для обеспечения высокой надежности и перегрузочной способности.

Связь силовых трасс на верхнем и нижнем слоях SKiN-пленки выполняется через массив переходных отверстий. Площадь сечения отверстий по меди очень мала (относительно слоев, несущих силовые токи), как и их длина (менее 100 мкм), при этом они имеют жесткую тепловую связь с чипами и медными трассами на подложке. Это обеспечивает низкое сопротивление и минимальное значение потерь.

Связь медных терминалов с трассами на DBC-подложке также производится методом спекания, благодаря чему выводы модуля способны отводить тепло от подключенных к ним внешних силовых шин. На рис. 8 показан тепловой профиль одного их первых вариантов 3D SKiN-модуля, отображающий рассеяние мощности пассивными элементами конструкции после достижения стационарного состояния. Профиль соответствует наиболее нагруженной токовой цепи при номинальном режиме работы модуля.

В верхней и нижней части изображения в зоне соединения терминала и подводящего кабеля («силовые подключения» на рисунке) наблюдается локальное повышение температуры (около 10 К), вызванное наличием контактного сопротивления. Перегрев SKiN-пленки в пределе достигает около 15 К.

Проведенные измерения показывают, что даже первоначальная версия модуля обладает хорошими тепловыми характеристиками, что подтверждается низким уровнем перегрева слоев. Анализ также указывает на те элементы конструкции, которые необходимо улучшить,

чтобы исключить локальные всплески температуры и обеспечить более равномерное распределение тока по металлизации SKiN-пленки.

Данная задача может быть решена путем оптимизации геометрии токонесущих трасс на верхней стороне пленки, что невозможно сделать при использовании алюминиевых проводников, количество которых ограничено размером контактных площадок на кремниевых кристаллах. Применение 3D SKiN-концепции открывает широкие возможности разработки технологий корпусирования для будущих поколений чипов с повышенной плотностью тока и расширенным температурным диапазоном. Токонесущая способность силовых цепей и соединений внутри модулей больше не является их узким местом.

Заключение

Современный рынок автоэлектроники предъявляет самые жесткие требования к силовым модулям, предназначенным для применения в энергетике, на транспорте, в мощных промышленных приводах. 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 дала возможность устранить последнее слабое место классических силовых ключей — сварное соединение алюминиевых выводов чипов, и создать базу для разработки силовых ключей с принципиально новыми возможностями. Трассировка электрических цепей по обеим сторонам SKiN-пленки значительно расширяет возможности проектирования силовых модулей и позволяет на 50% повысить плотность мощности при том же размере DBC-подложки. Благодаря копланарному положению и большой ширине силовых дорожек между шинами DC(-) (верхний слой SKiN-пленки) и DC(+), на DBC-подложке па-

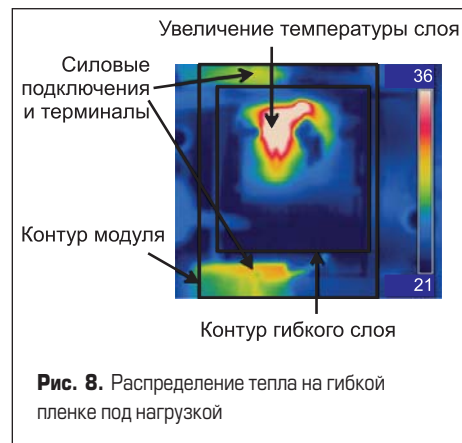


Рис. 8. Распределение тепла на гибкой пленке под нагрузкой

Таблица 3. Плотность тока в различных сегментах конструкции

Токонесущие сегменты конструкции	Действующая плотность тока, А/мм ² (длительность 10 с)
Стандартные алюминиевые проводники (Ø = 300 мм, длина 10 мм)	~200
Медные трассы на DBC-подложке SKiN-модуля 400 А (длина ≥10 мм)	≤180
Медные трассы на DBC-подложке 3D SKiN-модуля 600 А (длина ≥10 мм)	≤75
Медные трассы на гибкой пленке 3D SKiN-модуля 600 А (длина ≥10 мм)	≤180
Медные терминалы SKiN-модуля	≤35

разитная индуктивность цепи коммутации уменьшена до 1,3 нГн, что на 60% меньше типового значения.

Однако большая часть распределенной индуктивности приходится на силовые терминалы и их соединение с конденсаторами DC-шины, в котором должны выдерживаться определенные изоляционные промежутки. Усилия по дальнейшему совершенствованию конструкции будут сосредоточены на этом интерфейсе, улучшение которого возможно, например, при размещении модульного звена постоянного тока и снабберов на верхнем слое SKiN-пленки.

Концепция SKiN предлагает уникальные возможности проектирования, которые немислимы в рамках традиционных технологий пайки и ультразвуковой сварки. 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 позволяет кардинально решить вопрос увеличения срока службы. Серебро способно обеспечить долговременную стабильность свойств соединения керамической подложки с радиатором, кремниевыми кристаллами и выходными терминалами. Процесс спекания позволяет полностью реализовать возможности новых типов широкозонных полупроводников.

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.

Литература

1. Beckedahl P. Advanced Power Module Packaging for increased Operation Temperature

and Power Density // EPE-PEMC 2012. Novi Sad.

2. Kolar J.W. Performance, Trends and Limitations of Power electronic Systems // CIPS 2010. Nuremberg.
3. Stockmeier T., Beckedahl P., Göbl C., Malzer T. SKiN — Double side sintering technology for new packages // ISPSD 2011. San Diego.
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. Nuremberg.
5. Scheuermann U. Reliability of Planar SKiN Interconnect Technology // CIPS 2012. Nuremberg
6. Hille F., Umbach F., Raker T. Failure mechanism and improvement potential of IGBTs short circuit operation // Proc. ISPSD 2010. Hiroshima.
7. Göbl C. Low temperature sinter technology die attachment for power electronic applications // Proc. CIPS 2010. Nuremberg.