

Преобразование энергии и проблемы силовой электроники

Асеем ВАХИ (Aseem WANI)
Перевод: Андрей КОЛПАКОВ

Новая европейская политика сохранения окружающей среды фокусирует усилия промышленности на развитии возобновляемых источников энергии. Наиболее перспективны сейчас ветряная и солнечная энергетика. Вторым глобальным требованием, движущим современный рынок силовой электроники, является повышение эффективности преобразования и использования энергии. Для реализации этих условий необходимы компактные полупроводниковые силовые ключи, отличающиеся низкими потерями и высоким уровнем надежности. Разработка таких модулей невозможна без внедрения новых материалов, технологий кристаллов и методик корпусирования, обеспечивающих хорошие показатели надежности, высокую плотность тока, расширенный температурный диапазон.

За последние 2 десятилетия существенно возросло потребление энергии от первичных источников, в среднем прирост составляет 2% в год (рис. 1). Ожидается, что к 2030 году потребность увеличится на 50%. Следует отметить, что в настоящее время одна треть энергии первичных источников уходит на производство электроэнергии.

В 2004 году среднее мировое потребление составляло около 12 млрд кВт·ч (источник:

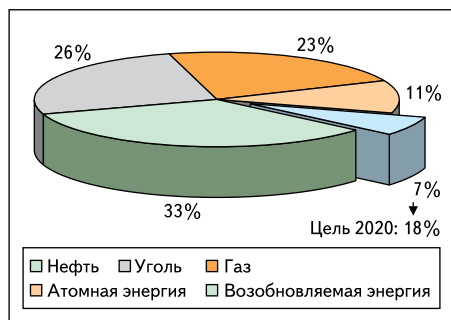


Рис. 1. Доля возобновляемых источников в структуре энергопотребления Германии

CPES 2004). Около 40% от этой величины используется общепромышленными производствами, которые до сих пор в большинстве случаев являются нерегулируемыми.

Осмысление политики в отношении окружающей среды

Сегодня основная доля мировой потребности в первичной энергии покрывается за счет сгорания углеводородов — нефти, газа, угля, что создает экологические проблемы и стало причиной парникового эффекта. Негативные последствия глобального потепления стали настолько очевидны, что экологические программы и планы по снижению эмиссии парниковых газов приняты в большинстве индустриально развитых стран. Краеугольным камнем новой экологической политики является освоение и широкое внедрение возобновляемых источников энергии и повышение эффективности преобразовательных устройств.

Европейские компании занимают лидирующее положение в области внедрения энергосберегающих и экологических технологий,

наиболее активно эта работа проводится в Германии. Для защиты окружающей среды необходимо в первую очередь снижать выделение углекислого газа: к 2020 году эмиссия CO₂ должна быть снижена на 14% по сравнению с 2005-м. В то же время процентное соотношение первичных возобновляемых источников в общем балансе за этот же срок должно быть увеличено до 18% (в 2005 году — 6%). С учетом лавинообразно растущего спроса на электроэнергию в Германии это означает, что доля возобновляемых источников за указанный период времени вырастет более чем в 2 раза (рис. 2). Долгосрочные прогнозы указывают, что к 2050 году такие источники энергии должны стать преобладающими и достичь в общем балансе 70%.

Наибольший сегмент «чистой» энергии (более 70 ГВт) вырабатывается сегодня в мире за счет ветра. В Германии ветроэнергетические установки (ВЭУ) обеспечивают около 24% данного сектора, следуя за станциями, работающими на биомассе и ГЭС (источник информации: Germany Ministry of Environment, март 2008 г.).

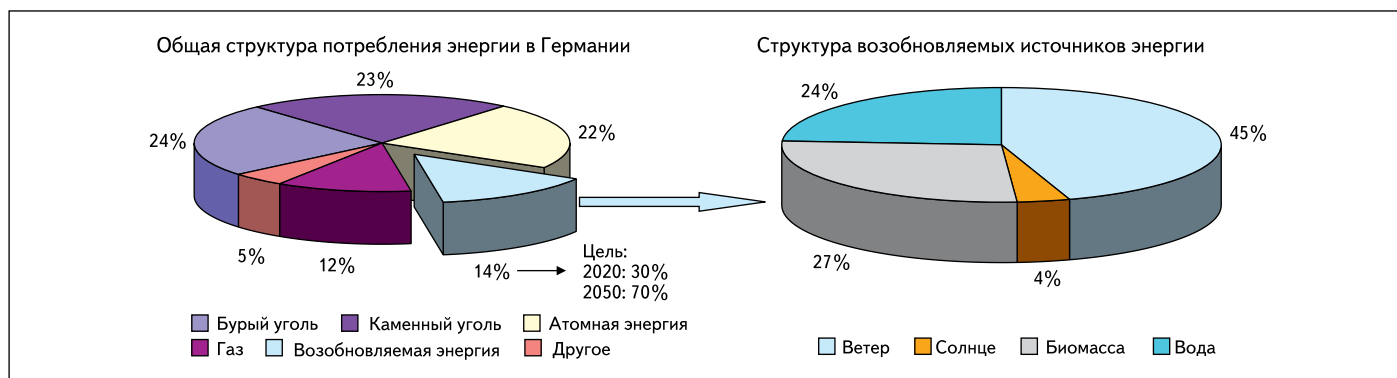


Рис. 2. Для возобновляемой энергии в общей структуре потребления Германии

Снижение стоимости электроэнергии

Широкое внедрение энергосберегающих технологий стимулируется различными методами, в том числе государственными финансовыми льготами. Одновременно идет процесс постоянного снижения стоимости выработки «чистой» энергии и повышения эффективности ее преобразования. Рассмотрим для примера стоимость солнечной электростанции как наиболее дорогого варианта альтернативной энергетической установки. В сентябре 2008 года удельная цена кристаллического фотоэлектрического модуля была около 3,5 евро/Вт, сегодня она снизилась более чем на 35%. Причиной этого, прежде всего, стало резкое увеличение объемов выпуска фотоэлементов и жесткая конкуренция, особенно со стороны китайских производителей. Немаловажным фактом является также заметное оживление рынка кристаллического кремния. Принимая во внимание указанные факты, можно предположить, что к концу 2010 года цена снизится до 1 евро за Вт. При этом стоимость выработки 1 кВт·ч электроэнергии на солнечной станции может стать соизмеримой с ценой энергии, получаемой от традиционных источников (по данным Spiegel Online, март 2009 г.; Photon).

Настало время силовой электроники

Растущие требования по энергосбережению и резкий рост сектора возобновляемых источников энергии дают хорошие возможности для развития рынка силовых полупроводников. Сказанное обусловлено двумя основными факторами. Во-первых, преобразование энергии невозможно без их применения, типичным примером может служить IGBT-инвертор ВЭУ. Во-вторых, на базе силовых модулей строятся частотно-регулируемые приводы (ЧРП), потребляющие основную часть производимого электричества и, кроме того, являющиеся неотъемлемыми узлами любой энергетической станции. ЧРП используются, например, для разворота солнечных панелей по направлению к солнцу или для управления шагом лопастей ветротурбины. В станциях, работающих на биогазе, приводы отвечают за точное смешивание и дозирование биомассы.

«Рабочей лошадью» современной силовой электроники являются модули IGBT, выпускаемые в настоящее время в большом количестве конфигураций и типов корпусов. Основой такого компонента служит силовой каскад, содержащий кремниевые чипы, соединенные в определенной конфигурации и установленные на изолирующей керамической подложке. Существует масса технологий корпусирования кристаллов, адаптированных для конкретной зада-

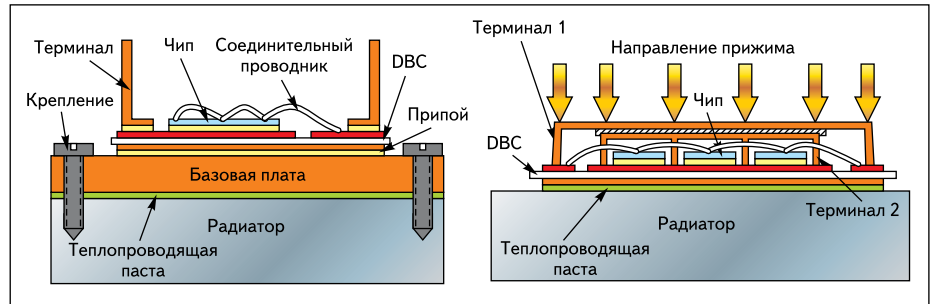


Рис. 3. Внешний вид и поперечное сечение: а) стандартного модуля IGBT; б) модуля прижимного типа SkiiP 3

чи. Наибольший интерес для применения в описываемой области имеют интеллектуальные силовые модули (IPM), благодаря своим широким функциональным возможностям, надежности и простоте использования. Кроме силового каскада, IPM может содержать плату управления затворами, датчики, а также теплоотвод.

В 2008 году доля полупроводниковых модулей на рынке возобновляемых источников энергии составляла около 7,5%, она увеличивается примерно на 25% в год. Ожидается, что к 2012 году общий объем сектора силовых модулей для данного применения достигнет 380 млн USD (источник информации: IMS quarterly update, февраль 2009 г.).

В области альтернативной энергетики одним из ключевых требований к элементной базе является надежность компонентов и стабильность поставок, гарантирующая отсутствие срывов планов ввода в эксплуатацию. На втором месте стоит эффективность преобразования и низкие массо-габаритные показатели аппаратуры. Для того чтобы удовлетворить подобные запросы, фирмы, выпускающие силовые модули, должны решить целый комплекс проблем, зачастую противоречивых.

Непрерывный рост мощностей конверторов и уменьшение их габаритов делают проблему отвода тепла одной из самых главных при проектировании. Например, в инверторе ветрогенератора мощностью 3 МВт рассеяние мощности на силовых ключах достигает 45 кВт. Такие потери создают тепловыделение, достаточное для отопления 3 небольших домов!

Основные проблемы производителей силовой электроники

Паяные соединения

Традиционно в модулях стандартной конструкции пайка используется для соединения медной базы с керамической изолирующей DBC-подложкой и для установки на нее кристаллов IGBT и диодов (рис. 3а). В то же время наличие этих жестких сочленений является и одной из основных причин отказов силовых ключей. При изменении окружающей температуры или нагреве чипов разница коэффициентов теплового расширения (КТР) меди и керамики создает термомеханические напряжения, приводящие к развитию усталостных процессов, росту теплового сопротивления, перегреву и постепенному разрушению паяного соединения. Особенно сильно этот эффект выражен в циклонагруженных применениях, таких как транспортный привод. Соединение базовой платы с изолирующей подложкой чаще всего вызывает проблемы, так как имеет наибольшую площадь.

Существует также технологическая проблема, заключающаяся в возможности образования зон «холодной пайки».

Базовая плата

Медная базовая плата (рис. 4), лежащая в основании стандартных силовых модулей, осуществляет передачу тепла на радиатор. Этот элемент конструкции во многом определяет тепловые и механические характеристики ключа, а также его вес, габариты и стоимость.

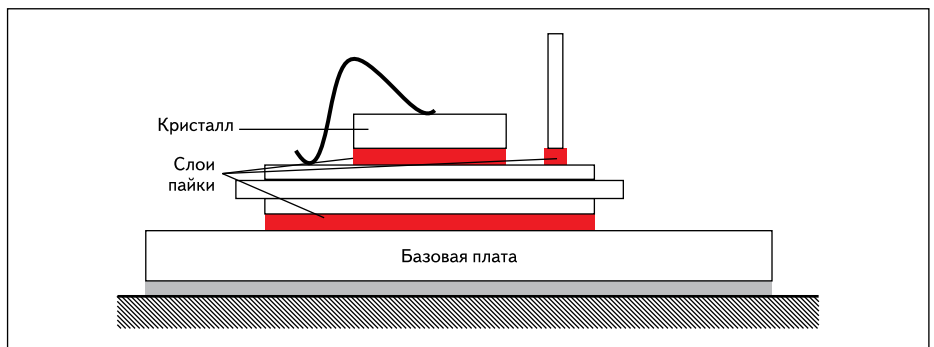


Рис. 4. Поперечное сечение стандартного модуля с паяным соединением силовых чипов

Жесткое паяное соединение базы и изолирующей подложки, кроме описанных выше проблем, создает так называемый биметаллический эффект. Он выражается в изгибе основания модуля при изменении температуры, в результате чего ухудшается тепловой контакт с радиатором. Единственным способом решения данной проблемы является использование достаточно толстого слоя теплопроводящей пасты (100 мкм для стандартных модулей), что приводит к увеличению теплового сопротивления теплостока.

Внутренние соединения модуля

В модулях с током 200 А и более для обеспечения требуемых мощностных и тепловых характеристик несколько полупроводниковых чипов соединяется параллельно на DBC-подложке. Основная проблема параллельного соединения кристаллов заключается в невозможности обеспечения абсолютной симметричности линий их подключения. Соответственно, разными будут распределенные параметры цепей коммутации токов параллельных чипов, отличаться будут и их динамические характеристики. Очевидно, что при нормировании технических характеристик модуля его параметры определяются свойствами наиболее нагруженного кристалла. Необходимо также учесть, что наличие распределенных сопротивлений и индуктивностей у токонесящих шин модуля и выводов чипов также ухудшает характеристики переключения, поэтому оптимизация внутреннего дизайна силового ключа — крайне важная задача.

Температура кристаллов

Тенденцией совершенствования технологии силовой электроники последних лет является использование тонкопленочных кристаллов и снижение их активной площади при одновременном увеличении плотности тока и снижении уровня потерь. Например, размер чипа IGBT 12 класса с номинальным током коллектора 150 А за несколько лет уменьшился более чем на 35%. Допустимая рабочая температура кристаллов последних поколений достигла 175 °С, что дало возможность разрабатывать более компактные и в то же время более мощные силовые ключи. Платой за расширение диапазона рабочих температур является повышение их градиентов в процессе эксплуатации и связанные с этим усталостные процессы, о которых шла речь в начале статьи. Таким образом, увеличение токовых нагрузок при уменьшении габаритов неизбежно ведет к снижению надежности силового модуля. Решение этой проблемы возможно только с помощью внедрения новых технологий сборки.

Решение дают инновационные технологии

Все описанные выше задачи в какой-то степени взаимосвязаны, поэтому интегральное решение является и наиболее правильным,

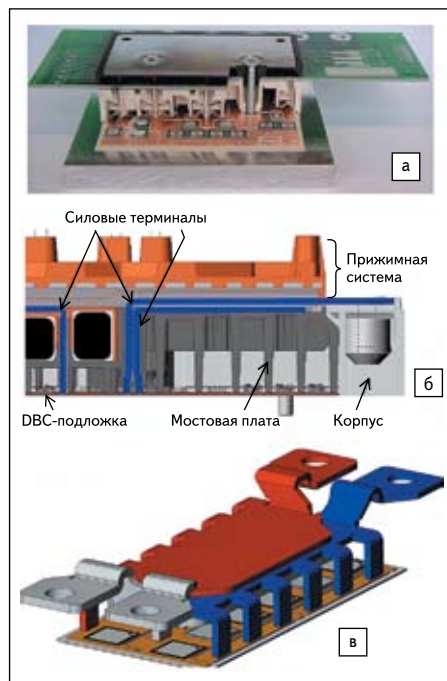


Рис. 5. Варианты прижимных конструкций (во всех случаях усталость паяного соединения исключена):
а) MiniSKiP — пружинные контакты;
б) SKiiP — мостовая плата;
в) SKiM — шины с многоточечным доступом

оно позволяет не анализировать каждый вопрос в отдельности. Полностью преодолеть проблему, связанную с усталостными процессами паяного соединения базовой платы, удалось еще в начале 1990-х годов, благодаря внедрению прижимной технологии SKiiP. В модулях данного типа полностью устранена база и, соответственно, слой пайки между ней и DBC-подложкой, которая в этом случае устанавливается непосредственно на радиатор. Электрические и тепловые связи в модулях SKiiP (кроме соединения чипов с керамикой) обеспечиваются только за счет прижима. Давление на керамическую подложку с кристаллами обеспечивается с помощью «пальцев» специальной мостовой пластины (рис. 5), причем оно осуществляется в местах, близких к зонам локального тепловыделения. Благодаря отсутствию «биметаллического эффекта» толщина слоя пасты в этом случае может быть снижена со 100 до 20–30 мкм, что позволяет более чем на 20% снизить общее значение теплового сопротивления.

Прижимная контактная система является достаточно гибкой, она может быть приспособлена к конкретным условиям эксплуатации независимо и геометрии силового ключа. Например, у компонентов семейства MiniSKiP (рис. 5а) все электрические соединения и давление на основание обеспечиваются пружинными контактами, расположенными в пластиковом корпусе элемента. Пружинные контакты с успехом заменяют паяные выводы при токе до 20 А, а при большей токовой нагрузке они могут объединяться в группы.

В модулях SKiiP и SKiM (рис. 5б, в) давление создается специальными прижимными элементами конструкции, которые также обеспечивают электрический контакт силовых терминалов с токонесящими шинами DBC-подложки. Многочисленные испытания и многолетний опыт эксплуатации подтвердили, что пружинные выводы гарантируют надежный контакт даже в условиях повышенных вибраций и воздействия агрессивных сред.

Одной из последних инноваций SEMIKRON, позволившей решить проблему паяного соединения чипов, стала технология низкотемпературного спекания серебряного нанопорошка, имеющая очевидные преимущества перед пайкой. В таблице приведены сравнительные характеристики стандартного припоя и нового материала. Прежде всего, необходимо обратить внимание на гораздо более высокую температуру плавления серебряного слоя. В отличие от обычного припоя, точка солидуса/ликвидуса серебра оказывается намного выше предельной рабочей температуры самого модуля. Это означает гораздо более высокую временную стабильность характеристик соединения, что особенно важно при больших градиентах перегрева чипов. Кроме того, в этом случае исключена и возможность возникновения усталостных процессов.

Сочетание хорошей теплопроводности серебряного слоя и его коэффициента теплового расширения (КТР) позволяет с успехом использовать этот материал для соединения кремниевых кристаллов с керамическими подложками различных типов. Применение технологии спекания позволяет в 5 раз поднять стойкость силовых ключей к термоциклированию и обеспечить их работу при повышенной температуре без какого-либо снижения показателя надежности.

Практически все современные технологии силовой электроники были использованы при разработке новой генерации модулей SKiM. Наиболее интересным элементом конструкции этих компонентов является копланарная DC-шина с многоточечным подключением (рис. 5в). Внешний вид DBC-платы SKiM с установленными на ней кристаллами IGBT и диодов показан на рис. 6, синими прямоугольниками отмечены зоны контактов DC- и AC-шин. Выше уже была обсуждена проблема выравнивания динамических пара-

Таблица. Сравнительные характеристики материалов

Параметр	Чистое серебро (Ag)	Порошковый слой Ag	Припой SnAg
Температура солидус/ликвидус, °С	961	961	221
Плотность, г/см ³	10,5	8,5	8,4
Электропроводность, мСм/м	68	41	7,8
Теплопроводность, Вт/м·К	250	240	70
КТР, мкм/м·К	19,3	19	28
Усилие растяжения, МПа	139	55	30

метров параллельных чипов. Распределение коммутационных перенапряжений на кристаллах, расположенных в различных точках DBC-платы также приведено на рисунке. Благодаря многоточечному контакту DC-терминалов достигается минимальное значение распределенной индуктивности L_s и кратчайший путь тока для каждого чипа. Конструкция SKiM обеспечила рекордно низкую суммарную величину L_s между DC+ и DC- терминалами — менее 20 нГн. Благодаря этому при выключении модуля не было выявлено заметной разницы в поведении параллельных кристаллов, независимо от их положения.

Заключение

Несмотря на тяжелую ситуацию, сложившуюся в мировой экономике, сектор возобновляемых источников энергии продолжает играть важнейшую роль на рынке силовой электроники. Эта тенденция сохранится и в будущем. Данная область техники продолжит стимулировать развитие промышленности и даже

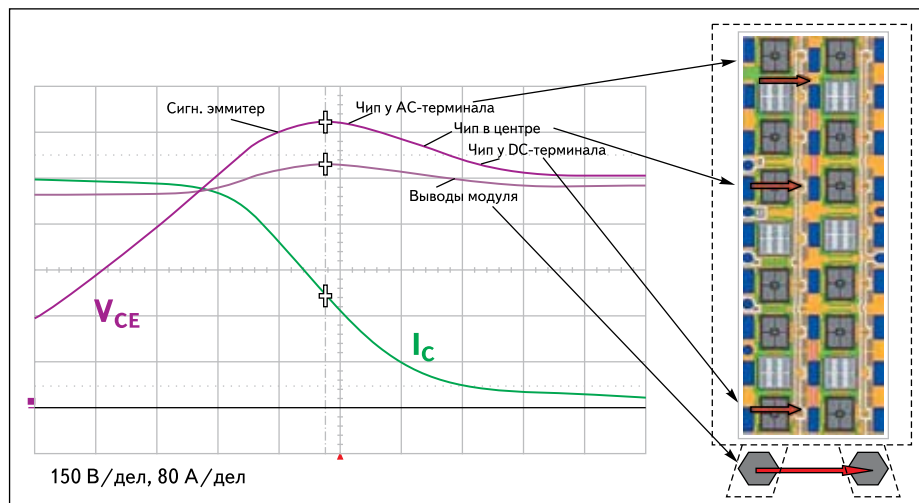


Рис. 6. Распределение коммутационных напряжений параллельных чипов, топология DBC-платы модуля SKiM

влиять на уровень занятости, чему послужит решение задач, поставленных производителями гибридных и электрических транспор-

тных средств, и внедрение новых технологий и материалов, появление SiC- и GaN-полупроводников. ■