

Технология SiC в модулях SEMIKRON

Постоянные улучшения свойств силовых кристаллов, поиск новых решений и совершенствование существующих технологических процессов приводят к непрерывным эволюционным изменениям характеристик электронных ключей. На сегодня наиболее широкое распространение на рынке силовой электроники получили кремниевые MOSFET/IGBT-модули и PIN-диоды. Основным препятствием на пути их дальнейшего совершенствования является высокое значение энергии потерь и ограниченный диапазон рабочих температур.

**Фолкер Демут
(Volker Demuth)**

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Революционные инновации в силовой электронике связаны, в первую очередь, с внедрением новых широкозонных материалов, применение которых позволяет не только повысить экономическую эффективность преобразования, но и создавать силовые ключи с принципиально новыми свойствами. Использование технологии карбида кремния (SiC) дает возможность существенно снизить уровень рассеиваемой мощности и расширить температурный диапазон. На основе широкозонных материалов можно создавать ключи с блокирующей способностью до 15 кВ и предельно низкими динамическими потерями. Точно так же

традиционные кремниевые диоды с мягкой характеристикой выключения с успехом могут быть вытеснены SiC-диодами с барьером Шоттки. Кроме всего прочего, теплопроводность компонентов на основе карбида кремния в три раза выше, чем у кремниевых аналогов.

Основные требования и направления развития приборов силовой электроники могут быть сформулированы следующим образом:

- повышение предельных значений коммутируемого тока и напряжения;
- снижение уровня статических и динамических потерь;
- расширение диапазона рабочих температур;
- повышение надежности, улучшение стойкости компонентов в аварийных режимах, увеличение срока службы;
- снижение удельной стоимости.

Решение этих вопросов неотделимо от процесса совершенствования технологий полупроводниковых кристаллов и внедрения новых материалов и структур кристаллов, в первую очередь широкозонных.

Применение передовых технологий изготовления и прецизионных методов контроля, уменьшение размеров полупроводниковых структур привели к тому, что свойства современных силовых полупроводниковых приборов подошли к пределам, обусловленным физическими свойствами кремния. Это является причиной поиска альтернативных полупроводниковых материалов, который ведется с начала 50-х годов и особенно активизировался в последнее время.

Внимание производителей силовых полупроводников в первую очередь сосредоточено на двух материалах с расширенной запрещенной зоной — SiC и нитриде галлия (GaN). По сравнению с кремнием, они имеют гораздо больший «энергетический зазор» между валентностью и зоной проводимости, что позволяет снизить потери проводимости и переключения, расширить температурный диапазон



и улучшить теплоотдачу. Таблица 1 содержит количественные характеристики базовых материалов для производства силовых чипов, а на рис. 1 [3] показано их влияние на физические свойства полупроводников.

Ключом к широкому применению карбида кремния является поиск экономически эффективной технологии производства монокристаллических кристаллов, которая решит проблему «биполярной деградации» и позволит выпускать пластины с размерами, оптимальными для серийного производства. В то время как кремний производится на 8" «условно бездефектных» пластинах (не более 10% поврежденных чипов) по удельной цене 0,1 €/см², плотность дефектов и, соответственно, стоимость пластин SiC диаметром 4 и 6" пока что примерно на порядок выше. Однако популярность карбидокремневых диодов и транзисторов неуклонно растет благодаря их уникальным характеристикам, в частности отсутствию заряда обратного восстановления.

GaN, обладающий несколько худшими характеристиками, чем SiC, пока что большей частью используется в оптоэлектронике. В качестве материала подложки для GaN в настоящее время применяется нетокопроводящий сапфир, поэтому компоненты из нитрида галлия должны иметь планарную структуру.

Чтобы полностью реализовать возможности широкозонных материалов, необходимо внедрение новых технологий, позволяющих заменить традиционную пайку (кристаллы, базовая плата) и ультразвуковую сварку (выводы кристаллов), которые во многом определяют физические пределы плотности мощности и температурного диапазона силовых модулей.

Путь освоения SiC-технологии был долгим и непростым. Первые 2" экспериментальные пластины, стоившие огромных денег, появились еще в середине 90-х. Низкий процент выхода годных многие годы оставался «кошмаром» производителей SiC-пластин, данная проблема обусловлена высокой плотностью дефектов и наличием трубчатых полостей по направлению роста кристаллов, приводящих к образованию сквозных отверстий при резке. Только спустя 15 лет упорной работы было освоено серийное производство 6-дюймовых пластин на основе так называемого «интеллектуального процесса выращивания». Это позволило снизить процент дефектных кристаллов и сделать технологию SiC более конкурентной при производстве компонентов силовой электроники.

Совершенствование производственных процессов позволяет снижать стоимость пластин и улучшать их нагрузочные характеристики. Следует ожидать, что уже в ближайшем будущем SiC-модули станут вытеснять традиционные типы полупроводников. На некоторых специфических рынках, таких как солнечная энергетика, это уже произошло. SiC-ключи в преобразователях солнечных батарей используются чаще кремниевых, несмотря на более высокую стоимость.

Таблица 1. Сравнение свойств материалов полупроводниковых кристаллов

Параметр	Наименование	Si	4H-SiC	GaN
Энергия запрещенной зоны	E_g , эВ	1,12	3,26	3,39
Плотность структуры	n_p , см ⁻³	$1,4 \times 10^{10}$	$8,2 \times 10^9$	$1,9 \times 10^{10}$
Пробивная напряженность поля	E_c , МВ/см	0,23	2,2	3,3
Подвижность электронов	μ_n , см ² /В·с	1400	950	1500
Дрейфовая скорость	v_{sat} , см/с	10^7	$2,7 \times 10^7$	$2,5 \times 10^7$
Диэлектрическая постоянная	ϵ_r	11,8	9,7	9,0
Теплопроводность	λ , Вт/см·К	1,5	3,8	1,3

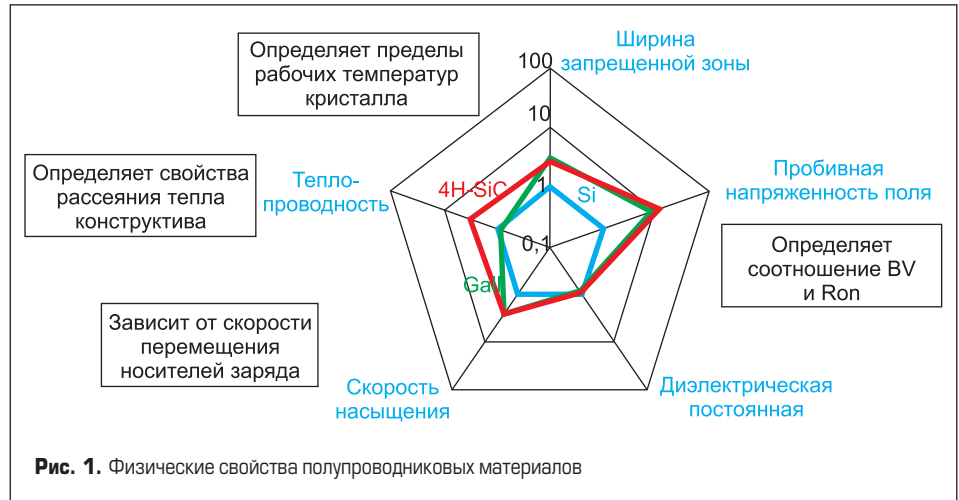


Рис. 1. Физические свойства полупроводниковых материалов

Гибридные SiC-модули

В компонентах данного типа кремниевые IGBT-кристаллы работают совместно с SiC-диодами Шоттки, используемыми в качестве антипараллельных/оппозитных. Хорошо известно, что динамические потери этих диодов намного ниже, чем у обычных, однако вопрос статических потерь требует более детального рассмотрения. Пока что величина прямого напряжения V_F у SiC-выпрямителей несколько выше, чем у кремниевых диодов такого же токового класса. На рис. 2 показаны прямые характеристики для различных типов 600-В диодов с номинальным током 10 А (SiC-диоды Шоттки, Si-диоды с мягкой характеристикой переключения (CAL HD), быстрые Si-диоды (Si-Fast)).

Минимальное прямое падение напряжения демонстрируют кремниевые выпрямители, V_F у SiC-диодов Шоттки несколько выше, а максимальное значение этого параметра имеют Si-Fast компоненты. Температурная зависимость прямого напряжения для разных компонентов отличается: Si-Fast имеют отрицательный ТКН (V_F при +150 °C ниже, чем при +25 °C), у CAL-диодов он положительный при токах более 12 А, у SiC-диодов Шоттки он положительный при токах более 4 А.

Положительный ТКН необходим для обеспечения баланса токов параллельно включенных кристаллов и равномерного распределения температуры по подложке модуля. С этой точки зрения наилучшими характеристиками обладают SiC-структуры, несмотря на то, что их статические потери выше, чем у Si-диодов с аналогичным номинальным током. Однако

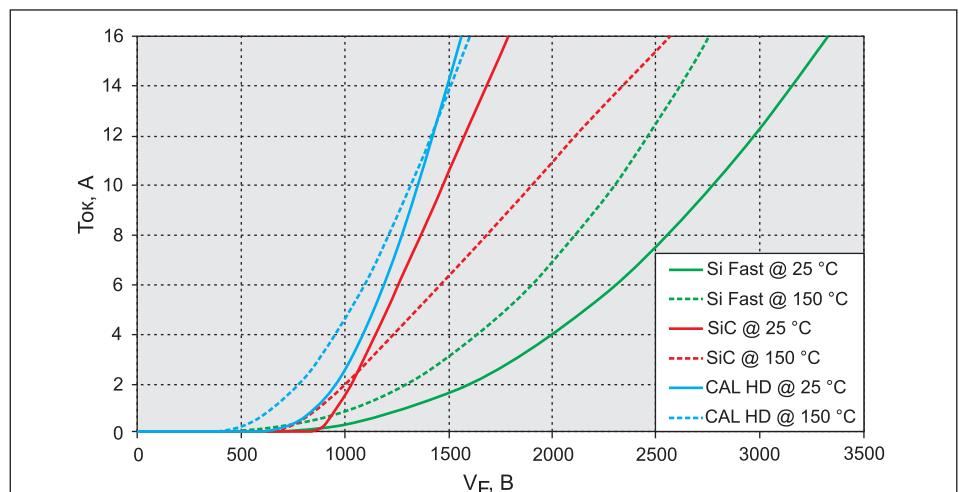


Рис. 2. Прямой ток и прямое падение напряжения для различных типов 10-А диодов при температуре +25 °C и +150 °C (SiC-диоды Шоттки, Si CAL HD, Si-Fast)

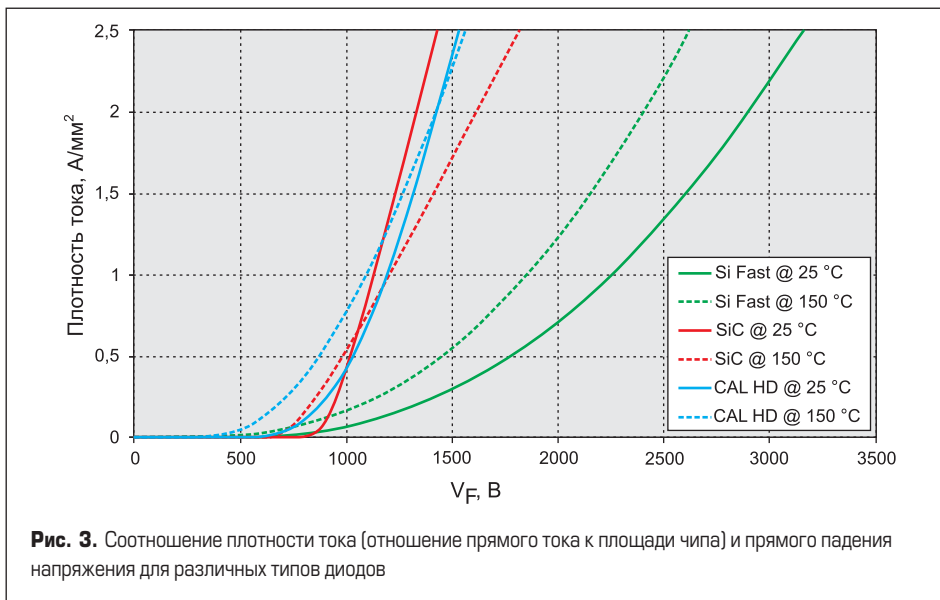


Таблица 2. Сравнительные динамические характеристики диодов: CAL HD, SiC-диоды Шоттки, Si-Fast (1200 В, 10 А)

Параметр	CAL HD	SiC	Si-Fast
	$V_R = 300 \text{ В}, I_F = 10 \text{ А}, T_J = +150 \text{ °С}$		
$di/dt, \text{ А/мкс}$	750	700	750
$I_{RRM}, \text{ А}$	14,9	5,0	8,2
$Q_{RR}, \text{ мкКл}$	1,36	0,098	0,226
$E_{off,D}, \text{ мДж}$	0,264	0,016	0,024

необходимо принять во внимание, что определение параметра «номинальный ток» у разных производителей может отличаться.

Корректное сопоставление можно провести, используя зависимость плотности тока (относительно площади чипа) от прямого падения напряжения. На рис. 3 показано, что

при эквивалентной плотности тока у кремниевых Si-диодов и SiC-диодов Шоттки величина V_F примерно одинакова, в то время как у быстрых диодов прямое падение заметно больше. Таким образом, можно сделать вывод, что Si- и SiC-структуры имеют сопоставимые статические потери при аналогичной

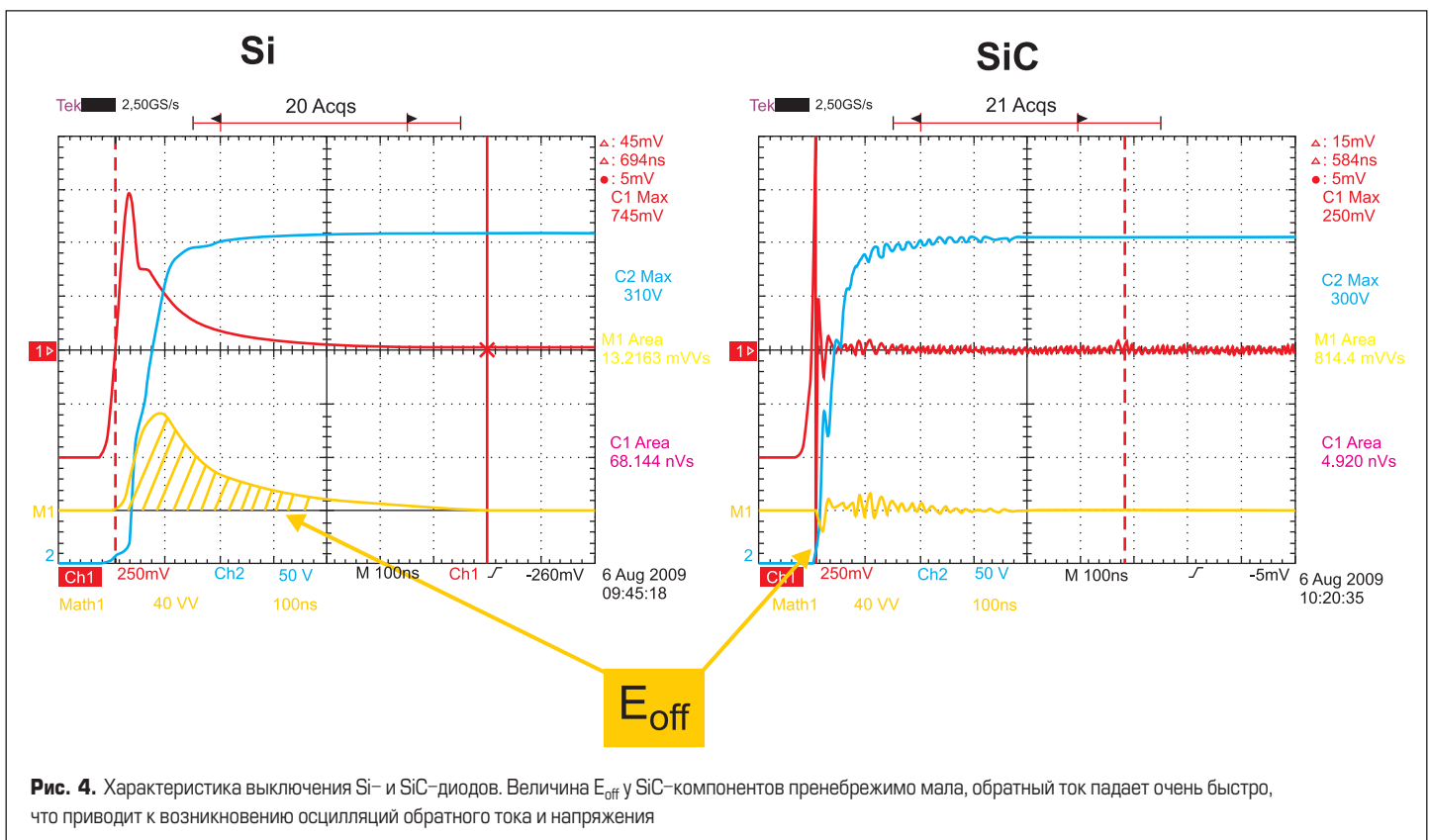
площади кристалла. Величина I_{nom} используется для нормирования уровня статических и динамических потерь, суммарное значение которых у SiC ниже, соответственно и размеры кристаллов у них, как правило, меньше.

Главным преимуществом карбидокремниевых структур является меньший уровень динамических потерь (таблица 2). По сравнению с аналогичными кремниевыми выпрямителями, у SiC-диодов ток обратного восстановления I_{RRM} ниже на 50%, заряд обратного восстановления Q_{RR} меньше в 14 раз, а энергия выключения E_{off} — в 16 раз! У Si-Fast структур динамические характеристики несколько лучше, однако они также существенно уступают карбиду кремния.

Общие потери инвертора, разработанного с применением SiC-диодов, соответственно оказываются заметно ниже, чем у преобразователей, построенных на обычных кремниевых компонентах аналогичного токового класса. Применение карбидокремниевых компонентов позволяет упростить систему охлаждения и повысить плотность мощности готового преобразователя. Особенно наглядно преимущества SiC-структур проявляются на высоких частотах коммутации.

Необходимо отметить, что использование компонентов с высокой скоростью коммутации создает свои проблемы, связанные с тем, что очень резкий спад обратного тока может привести к отсечке тока, возникновению паразитных осцилляций, повышению уровня EMI. При использовании кремниевых диодов проблемы отсечки не существует благодаря плавной характеристике восстановления.

На рис. 4 приведено сравнение динамических свойств CAL HD и SiC-диодов Шоттки, в первом случае диод демонстрирует хорошо известную «мягкую» характеристику выключо-



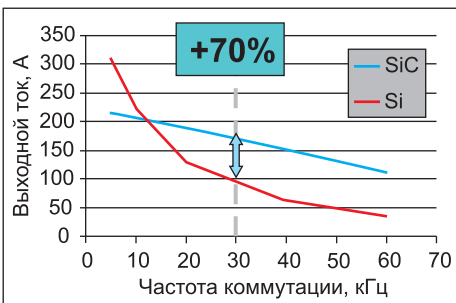


Рис. 5. Выходной ток трехфазного кремниевого модуля (1200 В, 450 А, Trench IGBT с CAL-диодом) и гибридного SiC-модуля (1200 В, 300 А, Fast IGBT с SiC-диодом Шоттки). Тепловой анализ сделан для модуля SKiM 93 с жидкостной системой охлаждения

чения. Так как обратный ток спадает плавно, на графике отсутствует выраженное коммутационное перенапряжение или паразитная генерация. Однако плавное выключение означает и повышенный уровень потерь E_{off} поскольку обратный ток проходит через диод одновременно с нарастанием напряжения на нем. Поскольку у SiC-структур нет заряда обратного восстановления, то и энергия выключения получается пренебрежимо малой. Резкий спад обратного тока приводит к возникновению осцилляций, наблюдаемых на эпюрах тока и напряжения. В нашем случае амплитуда колебаний достаточно мала, и они не представляют реальной опасности. Тем не менее быстрая характеристика выключения SiC-диодов Шоттки требует более внимательного отношения к трассировке токонесущих цепей на DBC-подложке модуля и проектированию силовых шин звена постоянного тока.

На рис. 5 представлена зависимость выходного тока от частоты коммутации для инвертора, построенного на трехфазном модуле IGBT (Trench IGBT + CAL-диод) и аналогичном гибридном SiC-модуле (Fast IGBT + SiC-

Таблица 3. Сравнение уровня статических и динамических потерь 25-А модуля IGBT 12 класса (Trench IGBT + CAL-диод) и 20-А 100% SiC-модуля (SiC MOSFET + SiC-диод Шоттки)

Параметр	Условия измерения	25-А IGBT MiniSKiiP 13AC12T4	20-А 100% SiC MiniSKiiP 13ACM12V15
$V_{CE(sat)}$, В	20 А, +150 °С	1,8	2,1
E_{on} , мДж	20 А, 600 В, +150 °С	2,7	0,9
E_{off} , мДж	20 А, 600 В, +150 °С	1,9	0,3

диод Шоттки) в конструктиве SKiM 93. Как и ожидалось, преимущества в динамических характеристиках SiC-структур позволяют заметно повысить мощность преобразователя на частотах коммутации выше 10 кГц. При использовании указанных типов кристаллов, выбранных из соображений минимальных динамических потерь, на 30 кГц увеличение выходного тока составляет более 70%.

Уменьшение уровня рассеиваемой мощности и увеличение выходного тока позволяют существенно снизить вес и габариты готового инвертора, что очень важно, например, для применения в тяговом приводе гибридного или электрического транспортного средства.

100% SiC-модули

Применение SiC-структур для производства не только диодов, но и силовых ключей (SiC MOSFET) обеспечивает дальнейшее снижение рассеиваемой инвертором мощности. В таблице 3 приведено сравнение уровня статических и динамических потерь 25-А трехфазного модуля IGBT с рабочим напряжением 1200 В и аналогичного 100% SiC-модуля. Его напряжение насыщения $V_{CE(sat)}$ на 17% больше, чем у Si-ключей, но величина потерь включения и выключения при этом заметно меньше: E_{on} — примерно в три раза, E_{off} — более чем в шесть раз. Следовательно, общие нагрузочные характеристики SiC-модуля гораздо лучше, чем у аналогичного IGBT, и это преимущество растет пропорционально F_{sw} (рис. 6).

На частотах коммутации выше 20 кГц выходная мощность полного SiC-ключа на 100%

выше, чем у аналогичного IGBT-модуля. Кроме того, отметим, что максимальный ток SiC-модулей с ростом частоты падает в гораздо меньшей степени, чем у Si-компонентов. Например, при увеличении F_{sw} от 10 до 40 кГц величина P_{out} снижается только на 28%.

В нашем примере благодаря меньшему значению потерь проводимости модули IGBT обеспечивают лучшие нагрузочные характеристики на частотах ниже 5–7 кГц, чаще всего используемых в приводах. Однако оптимизация SiC-структур для таких условий работы также возможна, особенно с учетом того, что основным сравниваемым параметром должна быть плотность мощности.

На рис. 7 приведены графики зависимости удельной выходной мощности, отнесенной к площади кристалла, для модуля MiniSKiiP, выполненного с применением Si- и SiC-кристаллов. Как показано на рисунке, плотность мощности 100% SiC-ключа намного больше, чем у аналогичного IGBT, причем это преимущество проявляется уже на частотах около 5 кГц. Применение кристаллов большей площади позволяет довести потери проводимости SiC до уровня IGBT, что позволяет производить SiC-модули, отличающиеся наилучшими мощностными характеристиками во всем диапазоне рабочих частот.

Заключение

К неоспоримым достоинствам SiC-структур на «уровне» силовых модулей следует отнести низкий уровень динамических потерь и хорошие тепловые характеристики. На «системном уровне» преимущества силовых ключей на основе карбида кремния позволяют

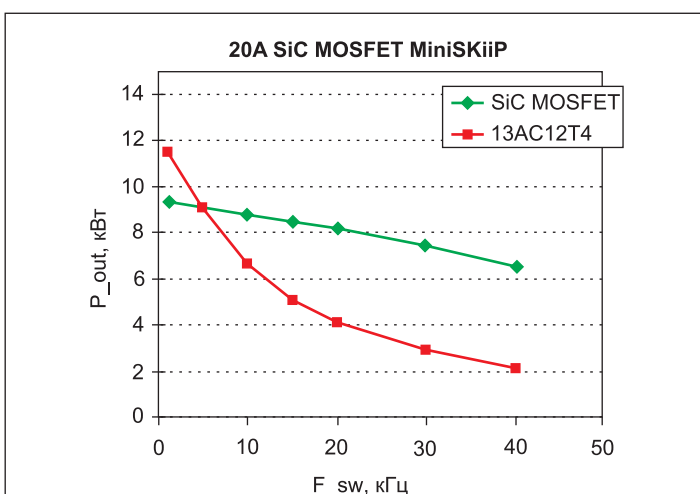


Рис. 6. Зависимость выходной мощности P_{out} от частоты коммутации F_{sw} для 20-А трехфазного SiC MOSFET модуля и 25-А модуля IGBT 12 класса

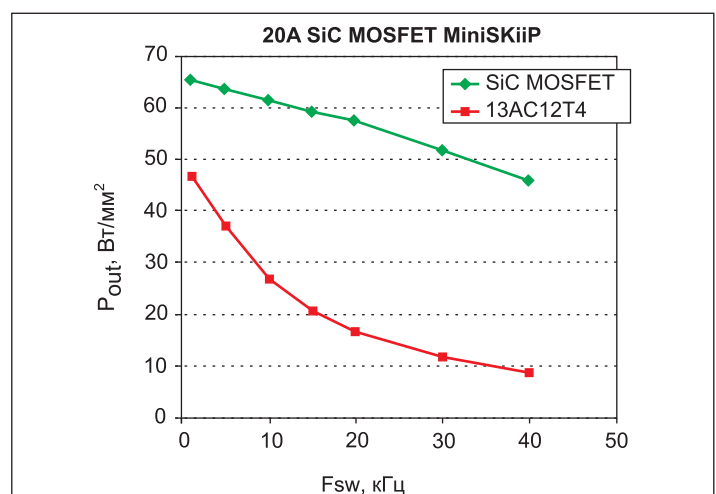


Рис. 7. Зависимость плотности мощности (выходная мощность, отнесенная к площади кристалла) от частоты коммутации F_{sw} модуля IGBT MiniSKiiP 13AC12T4 и аналогичного MiniSKiiP SiC MOSFET (тепловые расчеты выполнены для режима воздушного охлаждения при температуре +40 °С)

заметно повысить выходную мощность преобразовательных устройств при существенном улучшении их массогабаритных показателей. Важно, что прибавка мощности при этом достигается без повышения эффективности системы охлаждения благодаря кардинальному снижению потерь силового каскада. Соответственно растет и КПД преобразователя, особенно на высоких частотах, что имеет ключевое значение для таких устройств, как инверторы солнечных батарей и источники бесперебойного питания.

Переход на более высокие частоты коммутации дает возможность упростить выходной LC-фильтр, цена и габариты которого вносят существенный вклад в общие показатели готового изделия. В зависимости от площади кристаллов преимущества SiC-ключей могут распространяться на диапазон низких частот (3–4 кГц), характерный для приводных применений.

К важным достоинствам карбидокремниевых структур также относится положительный температурный коэффициент прямого напряжения (как для MOSFET, так и для диодов), что позволяет наращивать мощность за счет параллельного соединения кристаллов в модуле и силовых ключей в системе.

Тем не менее существует проблема небаланса токов затворов при включении. У кремниевых IGBT, имеющих низкое внутреннее сопротивление затвора, заметное влияние на распределение токов оказывает разница паразитных индуктивностей цепей управления. В худшем случае это может привести к разрушению кремниевых структур вследствие пусковых перегрузок и вызванных ими паразитных осцилляций.

В отличие от IGBT, SiC-транзисторы имеют относительно высокое внутреннее сопротивление затвора (несколько Ом). Благодаря это-

му приемлемое распределение токов управления параллельных чипов обеспечивается без применения дополнительных резисторов R_g . Данные свойства чипов SiC MOSFET делают их соединение очень простым, без потери баланса токов стока и затвора, соответственно отсутствует опасность возникновения теплового пробоя или паразитных резонансных колебаний.

Применение широкозонных материалов позволяет увеличить предельную рабочую температуру кристаллов как минимум до +200 °С. Однако для того, чтобы реализация этих возможностей происходила без ухудшения показателей надежности, необходимо внедрение соответствующих технологий корпусирования модулей, поиск новых интерфейсных материалов, отказ от традиционных технологий пайки и сварки. Кардинальным решением данной проблемы стало внедрение компанией SEMIKRON процесса низкотемпературного спекания [4] и разработка SKiN-технологии [5].

Широкому применению SiC-компонентов на сегодня препятствует ограниченная нагрузочная способность и высокая цена. Основным путем расширения токового диапазона является увеличение размера чипа, однако это не лучший способ в отношении SiC-структур, поскольку он ведет к росту процента дефектных кристаллов и дальнейшему повышению стоимости готовых изделий. Стоимость таких компонентов (как гибридных, так и 100%) по-прежнему остается очень высокой в сравнении с Si-аналогами.

Экономические расчеты показывают, что для достижения конкурентоспособных показателей цена SiC-модулей должна быть снижена в среднем в два-три раза. Поэтому пока что их использование оправдано, прежде всего, в высокочастотных, компактных

преобразователях. Хорошие массогабаритные показатели очень важны, например, в ветроэнергетических установках, где применение более компактного инвертора не только освобождает пространство внутри гондолы, но и позволяет снизить расходы на транспортировку и монтаж.

Что касается проблемы снижения стоимости SiC-компонентов, то перспективы здесь можно рассматривать как обнадеживающие. Анализ рынка показывает, что в ближайшие три года цены на SiC-диоды Шоттки упадут примерно на 30%, на SiC MOSFET — на 40%, что существенно повысит их коммерческую привлекательность. В результате этого как гибридные, так и 100% SiC-модули могут стать конкурентоспособными не только на нишевых рынках, но и в традиционных для силовой электроники применениях. Компания SEMIKRON собирается использовать SiC-диоды Шоттки и ключи SiC MOSFET в компонентах семейств MiniSKiiP и SKiM, которые должны появиться на рынке уже в 2014 г.

Литература

1. Volker Demuth. Silicon Carbide Boost Power Module Performance // Power Electronics EUROPE. Issue 4. June 2013.
2. Application Manual Power Semiconductors. SEMIKRON International GmbH. 2010.
3. Majumdar G., Oomori T. Some key researches on SiC device technologies and their predicted advantages // Conference Proceedings. EPE 2009.
4. Колпаков А. Технология низкотемпературного спекания в силовых модулях // Компоненты и технологии. 2009. № 7.
5. Колпаков А. SKiN-технология — силовая электроника завтрашнего дня // Силовая электроника. 2013. № 1.