

# Силовая продукция CREE: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ для российского рынка

Евгения КУРЫШЕВА  
e.kurysheva@compel.ru  
Юрий ГОЛОД  
yag.spb@compel.ru

**Силовые приборы на основе карбида кремния — высоковольтные диоды Шоттки и MOSFET-транзисторы — находят все более широкое применение в тех секторах, где особенно важно получить максимальную эффективность преобразования электрической энергии. Уникальные характеристики этих приборов позволяют не только снизить потери энергии в преобразователях напряжения, но и существенно уменьшить массо-габаритные параметры и повысить надежность современных силовых систем.**

## Введение

Компания CREE, Inc. была основана в 1987 году в штате Северная Каролина (США). Ее базовое направление — разработка и производство полупроводниковых материалов на основе карбида кремния (SiC). В 1991 году компания впервые в мире организовала коммерческий выпуск подложек из монокристалла карбида кремния. В начале 1990-х годов CREE начала интенсивные исследования в области светоизлучающих структур нитрида галлия (GaN) и твердых растворов на его основе на подложках из SiC.

Компания быстро прогрессировала и заняла лидирующие позиции на мировом рынке в секторе силовых приборов на основе карбида кремния. В 1993 году CREE разработала СВЧ-транзистор на подложке SiC, работающий на частоте 12,9 ГГц. В 2001 году разработана технология диодов Шоттки на SiC. В августе 2002 года была завершена разработка мощного диода Шоттки 20 А, 600 В, Zero Recovery. В апреле 2010 года начался серийный выпуск серии диодов Шоттки Z-Rec на 1200 В, а в феврале 2012 года — на 1700 В. Компания CREE выпускает подложки и эпитаксиальные материалы для других производителей полупроводниковых приборов, а также для исследовательских центров.

Благодаря уникальным технологиям производства полупроводниковых материалов на основе SiC продукция CREE обладает высочайшей надежностью и недостижимыми для конкурентов электрическими характеристиками, что делает возможным ее применение как в бытовой и промышленной, так в военной и космической ап-

паратуре (рис. 1). Производство карбидокремниевых приборов — диодов Шоттки и MOSFET-транзисторов — освоено в настоящее время многими компаниями: CREE, Infineon, ROHM, Advanced Power Technology, IXYS, STM, Mitsubishi Electric. Полный цикл выпуска силовых приборов основан на технологии производства подложек карбида кремния, эпитаксиальном выращивании активного слоя на подложке и, наконец, изготовлении силовых приборов и силовых готовых модулей. Компания CREE обладает необходимыми производственными мощностями, чтобы обеспечить полный цикл производства силовых приборов, начиная с создания базовых карбидокремниевых подложек. Компания также поставляет свои подложки другим производителям силовых приборов.

Качество готовой продукции в большей мере обеспечено многими факторами: качеством подложки (отсутствие дефектов кристаллической структуры, качество обработки поверхности, в частности полировки), качеством эпитаксиального слоя и, разумеется, качеством формирования самой структуры. Реализация уникальных свойств SiC в значительной степени определяется уровнем развития технологии формирования приборных структур. Одной из проблем получения эпитаксиальных слоев карбида кремния является подложечный материал. Максимальный размер коммерчески доступных подложек карбида кремния гексагональных политипных модификаций 4H- и 6H-SiC сейчас ограничен 4 дюймами (100 мм), а стоимость их существенно превышает стоимость кремниевых подложек. Технология 4H и 6H 3-дюймовых SiC-подложек была разработана CREE еще в 2001 году. А в 2010 году эта компания создала технологию подложек размером уже 150 мм. Использование подложек большего размера позволит увеличить технологичность процессов и уменьшить стоимость продукции.

Применение силовых полупроводниковых приборов на основе карбида кремния дает несомненный выигрыш в эффективности преобразования энергии, а также уменьшение массо-габаритных параметров. Но для производства приборов требуется довольно дорогая технология. Процесс формирования планарной силовой структуры практически такой же, как и для кремния. Однако есть свои сложности: травление и обработка самих подложек очень трудоемки. Процесс выращивания подложек дорог. Требуется обеспечить высокий уровень бездефектности кристаллической структуры. Высокая цена SiC-приборов пока ограничивает сферы их применения. Однако реализация программы уменьшения потребления электроэнергии в быту и промышленности в рамках энергосберегающих технологий будет неуклонно приводить к расширению сферы применения карбидокремниевых силовых приборов.

Карбид кремния — единственное полупроводниковое бинарное соединение AlVBiV. Ширина запрещенной зоны для кристаллов

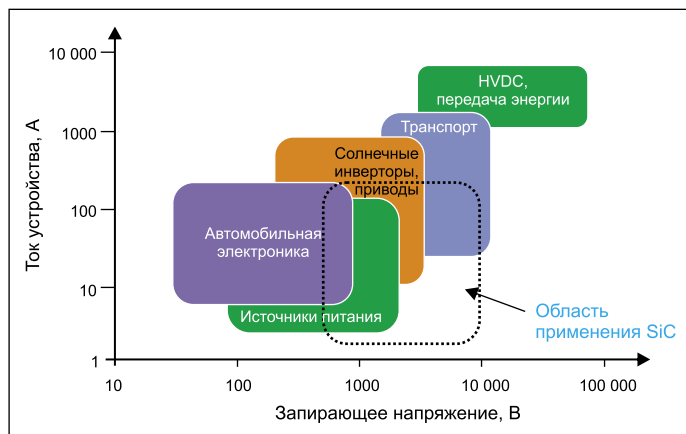


Рис. 1. Область применения SiC-диодов Шоттки

SiC составляет 2,39 эВ, а для различных модификаций SiC она может иметь значение в пределах от 2,72 до 3,34 эВ. Большие значения ширины запрещенной зоны позволяют создавать на основе SiC полупроводниковые приборы, сохраняющие работоспособность при температуре до +600 °С. Кристаллы SiC выращивают из газовой фазы или из растворов в расплаве.

Для получения монокристаллов карбида кремния большое распространение получил метод сублимации. При этом методе рост кристаллов карбида кремния происходит из газовой фазы в графитовых тиглях в атмосфере инертных газов и при температуре +2500...2600 °С. Особенность технологии — в сложности травления карбида кремния. При комнатной температуре материал не травится кислотами. Он не вступает в реакцию с минеральными кислотами любых концентраций, включая и плавиковую кислоту, но при комнатной температуре химически взаимодействует с ортофосфорной кислотой и смесью азотной и плавиковой кислот. Ввиду большой твердости подложки из карбида кремния плохо поддаются механической обработке. Очень трудно обеспечить качество подложек, соответствующее уровню дефектности кремния. Однако компания CREE постоянно совершенствует технологию производства, чтобы обеспечить большую доступность своей продукции.

CREE — мировой лидер в производстве мощных диодов на карбиде кремния, применяемых в системах контроля и управления питанием различных устройств. Этот класс силовых приборов обеспечивает увеличение эффективности преобразования энергии, уменьшение размеров приборов и увеличение частоты преобразования энергии для следующих приложений:

- выпрямители силовых модулей;
- корректоры коэффициента мощности;
- промышленные контроллеры электроприводов;
- выпрямители выходного сигнала;
- инверторы напряжения для солнечных батарей;
- импульсные источники питания (Switch Mode Power Supply, SMPS);
- гибридные автомобили;
- военные коммуникационные приборы.

Основные достоинства и преимущества силовых приборов на основе карбида кремния:

- Устойчивость к радиации (HiRel-приложения).
- Высокое быстродействие (высокая эффективность преобразования энергии, низкие потери).
- Высокая теплопроводность (в три раза больше, чем у кремния).
- Высокая допустимая рабочая температура, вплоть до +600 °С.
- Высокая критическая напряженность электрического поля пробоя (в 10 раз больше, чем у кремния).
- Меньший ток утечки диодов Шоттки за счет увеличения ширины запрещенной зоны.
- Нулевые потери обратного восстановления. Выключение SiC-диодов Шоттки не сопровождается процессом рассасывания заряда, а ток обратного восстановления отсутствует. Это существенно уменьшает потери в импульсных преобразователях энергии.
- Карбидокремниевые MOSFET имеют сопротивление открытого канала на порядок меньше, чем у кремниевых транзисторов, — единицы мОм·см<sup>2</sup>.

Высокое быстродействие дает возможность удвоения частоты преобразования без ухудшения характеристик переключения, что, в свою очередь, позволяет уменьшить габариты индуктивных компонентов схемы. Уменьшение частоты преобразования позволяет упростить фильтрацию ЭМИ, создаваемых при работе преобразователя, и уменьшить габариты фильтров по питанию. Высокая плотность мощности — пожалуй, главное преимущество SiC-диодов и MOSFET над обычными кремниевыми устройствами.

Еще одно преимущество высоковольтных диодов Шоттки состоит в их исключительных динамических характеристиках. Заряд обратного восстановления этих диодов очень низок (менее 20 нКл), поэтому емкость перехода не сохраняет заряд. В отличие от кремниевых PiN-диодов скорость нарастания тока  $di/dt$  не зависит от величины прямого тока и температуры. Сверхмалое значение заряда карбидо-

кремниевых диодов Шоттки обеспечивает уменьшение потерь на переключение в приборах импульсной силовой электроники. Диоды работают при максимальной температуре перехода +175 °С.

Карбидокремниевые диоды Шоттки обладают рядом замечательных свойств:

- Очень малое время восстановления основных носителей заряда при переключениях.
- Малый обратный ток.
- Более высокое напряжение пробоя, чем у кремниевых приборов.
- Низкое прямое сопротивление потерь по сравнению с Si- и GaAs-диодами.
- Практическое отсутствие влияния температуры на динамические характеристики переключения.
- Высокая температура функционирования (до 175 °С).
- Высокая плотность тока при очень малых размерах кристалла, так как проводимость SiC в три раза больше, чем у Si, и сравнима с проводимостью меди.
- Высокая частота переключения (до 500 кГц), что позволяет уменьшить фильтр электромагнитных помех и размеры других пассивных компонентов.

Семейства CREE Z-Rec и ZERO RECOVERY выпрямительных диодов имеют высокое обратное напряжение 600, 650, 1200 и 1700 В и ориентированы на приложения, в которых особенно важны низкие потери на переключение. Сюда включены приборы с рабочими токами:

- 1, 2, 4, 6, 8, 10 и 20 А и обратным напряжением 600 В;
- 4, 6, 8 и 10 А и обратным напряжением 650 В;
- 5, 10 и 20 А и обратным напряжением 1200 В;
- 10 и 25 А при обратном напряжении 1700 В.

Диоды выпускаются в корпусах TO-220, TO-252 и TO-247. Бескорпусные диоды компания поставляет фирмам, специализирующимся на создании интегральных силовых модулей, например в качестве антипараллельных диодов для мощных IGBT- или MOSFET-транзисторов.

Диоды Шоттки компании CREE находят применение в импульсной силовой электронике: в схемах корректоров коэффициента мощности, приводах электродвигателей и др. Применение этих приборов оправдывает себя при работе на повышенных частотах и напряжениях, что делает их экономически выгодными.

Благодаря уникальным свойствам SiC-диодов они могут работать на частотах вплоть до 500 кГц, обеспечивая высокую эффективность устройств порядка 92%. При работе на высоких частотах уменьшаются габариты индуктивностей примерно на 30%. Благодаря отсутствию тока обратного восстановления снижаются электромагнитные помехи, а значит, можно сэкономить на сетевом фильтре. Уменьшение размера и веса электронных систем первоначально обусловлено требованием рынка к возрастающей плотности мощности. Для того чтобы достигнуть этой цели без ущерба для функциональности системы, необходимо уменьшить размер и вес импульсного источника питания этой системы. В этом смысле SiC-диоды обладают рядом отличий:

- Очень малое (практически нулевое!) время восстановления основных носителей заряда при переключениях.
- Более высокое напряжение пробоя, чем у кремниевых приборов.
- Высокая температура функционирования: до +175 °С.
- Высокая частота переключения, до 500 кГц, что уменьшает размер фильтра электромагнитных помех и размеры других пассивных компонентов.
- Уменьшение либо исключение активных или пассивных демпферных цепей.
- Положительный температурный коэффициент прямого падения напряжения позволяет осуществлять параллельное включение диодов без дополнительных компенсирующих цепей.

Сопротивление перехода в прямом смещении SiC мощных диодов увеличивается с ростом температуры благодаря снижению подвижности электронов при повышенных температурах. При токе через диод 10 А и температуре +25 °С падение напряжения составляет 1,5 В. При увеличении температуры ток уменьшается при том же значе-

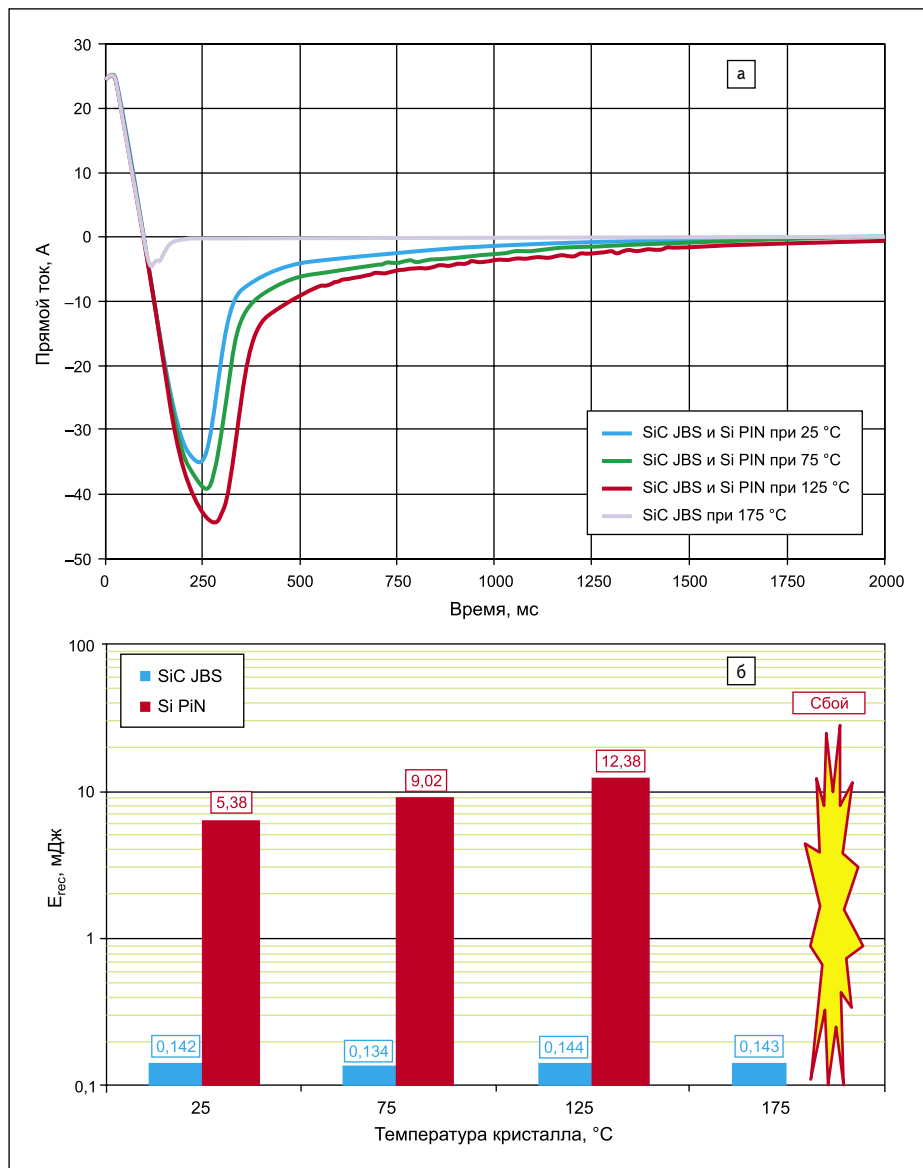


Рис. 2. Сравнение потерь: а) обратного восстановления 400 А/мкс,  $V_R = 1,2$  кВ,  $I_F = 25$  А; б)  $E_{rec}$  на диоде

нии прямого напряжения. Отрицательный температурный коэффициент прямого тока позволяет соединять диоды параллельно, неравномерного распределения токов при этом не возникает. Это поведение подобно поведению высоковольтных кремниевых PiN-диодов. Типичное значение тока утечки при 600 В и +25 °С составляет менее 50 мкА, а при увеличении температуры до +200 °С ток утечки увеличивается всего лишь до 70 мкА, что незначительно для такого широкого диапазона температур.

### Применение SiC-диодов Шоттки

Замена обычных кремниевых диодов в активных корректорах коэффициента мощности на SiC-диоды обеспечивает значительное увеличение эффективности преобразования энергии. Одним из основных компонентов, определяющих массо-габаритные показатели ККМ, является дроссель повышающего

преобразователя L1. Уменьшение его размеров возможно за счет повышения частоты преобразования. Однако при использовании кремниевых приборов это неизбежно приводит к росту динамических потерь (рис. 2) в ключевом транзисторе и диоде, а также требует увеличения размеров теплоотвода.

На рис. 3а показана типовая схема классического активного корректора коэффициента мощности. Эксперименты показали, что простая замена кремниевых диодов на SiC-диоды CREE позволяет снизить тепловые потери в ККМ почти вдвое. Помимо корректоров коэффициента мощности (рис. 3б, в) SiC-диоды особенно эффективны в качестве диодов, включаемых параллельно мощным IGBT- и MOSFET-транзисторам и модулям. Это особенно актуально для мостовых инверторов, работающих на индуктивную нагрузку. В приводах электродвигателей потери за счет обратного восстановления диода вносят существенный вклад в рассеиваемую мощность.

Очевидно, что использование в силовых модулях более высоких частот преобразования обеспечивает несомненный выигрыш по всем базовым показателям (таблица). Использование же силовых приборов на основе SiC-технологии обеспечивает не только работу на более высоких частотах и напряжениях, но и дополнительное уменьшение потерь мощности.

Серия SiC-диодов на напряжения 600 и 1200 В фирмы CREE — это высоковольтные полупроводниковые выпрямительные диоды Шоттки. Диоды на основе карбида кремния уже проникли в быстро развивающийся рынок инверторов для систем питания на основе солнечных батарей, в частности в Европе. Карбидокремниевые диоды Шоттки компании CREE, рассчитанные на работу с напряжением 1200 и 1700 В, начинают использовать вместо кремниевых диодов в демпферной части, работающей с постоянным напряжением, и скоро их будут внедрять в инверторную часть коммерчески доступных систем.

### Первый коммерческий SiC MOSFET

Наряду с диодами на карбиде кремния компания CREE занималась и разработкой модулей MOSFET. Первый коммерческий мощный MOSFET на карбиде кремния был представлен в 2010 году. Карбидокремниевый MOSFET можно использовать для преобразователей солнечной энергии, источников питания высокого напряжения и создания источников питания для промышленных приложений. Использование мощного MOSFET SiC совместно с семейством диодов Шоттки на основе карбида кремния позволит инженерам — конструкторам источников питания разработать приложения целиком на основе карбида кремния (all-SiC application), создать реализации критических схем коммутации высокой мощности и систем с уровнями эффективности энергопотребления, размерами и весом, которые не достижимы с любыми коммерчески доступными кремниевыми устройствами питания с аналогичными параметрами.

Таблица. Базовые показатели силовых модулей

| Наименование | $R_{DS(ON)}$ , мОм | VRRM, В | Корпус   |
|--------------|--------------------|---------|----------|
| CMF10120D    | 160                | 1200    | TO-247-3 |
| CMF20120D    | 80                 |         |          |

CMF20120D, SiC MOSFET компании CREE, обеспечивает запирающие напряжения до 1200 В с сопротивлением прямого перехода ( $R_{DS(ON)}$ ) всего 80 мОм при +25 °С. По сравнению с сопоставимыми кремниевыми устройствами для SiC MOSFET  $R_{DS(ON)}$  остается ниже 100 мОм во всем диапазоне рабочих температур. Сочетание показателей производительности и условия эксплуатации, наряду с правильной архитектурой устройства MOSFET

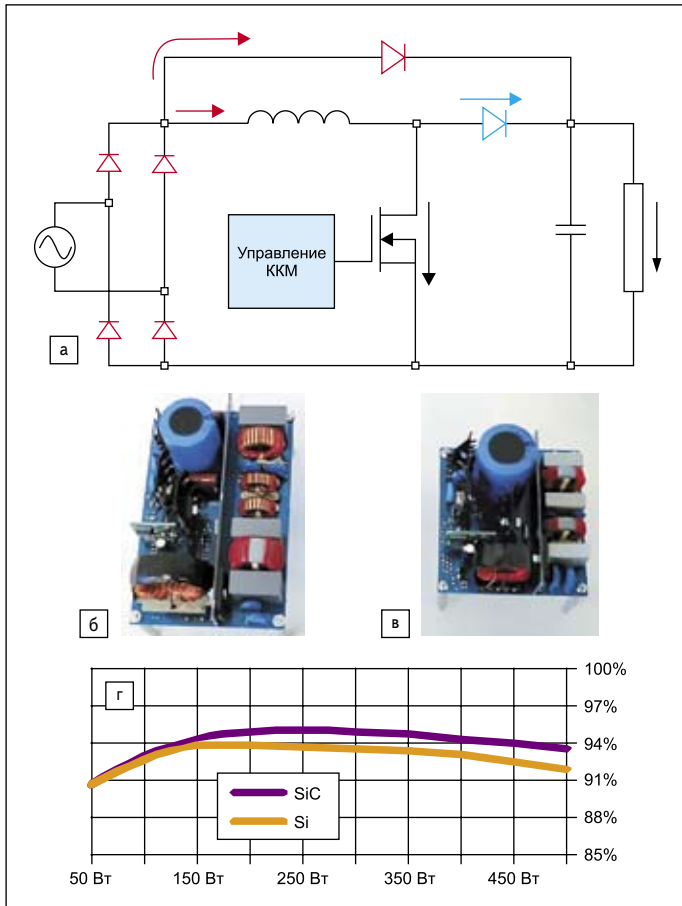


Рис. 3. а) Типовая схема классического корректора мощности; б, в) внешний вид корректора мощности: б) на кремниевых силовых компонентах, работающих на частоте 80 Гц; в) на карбидокремниевых диоде и транзисторе, работающих на частоте 200 кГц; г) график эффективности ККМ 900 В AC

(normally-off), делает его использование оптимальным для схем коммутации в силовой электронике. По сравнению с доступным коммерческим кремниевым MOSFET или устройствами IGBT с аналогичными параметрами в тестах, которые провела компания CREE, у CMF20120D был самый низкий заряд затвора ( $Q_G < 100 \text{ nC}$ ) в рекомендуемом диапазоне входного напряжения. Потери проводимости были минимизированы при прямом падении напряжения ( $V_F$ )  $< 2 \text{ В}$  и токе  $20 \text{ А}$ .

Разработанный компанией CREE SiC MOSFET имеет более высокое рабочее напряжение, чем у кремниевого MOSFET. Этот прибор позволяет установить новый стандарт для энергосберегающих силовых ключей и предоставляет возможность разработки схем высокого напряжения с высокими скоростями переключения и сверхнизкими потерями мощности.

Основные характеристики:

- Полярность транзистора: *n*-канальная.
- Предельное напряжение питания:  $1200 \text{ В}$ .
- Управляющее напряжение на затворе  $V_{GS \text{ max}}$ :  $25 \text{ В}$ .
- Сопротивление открытого канала: не более  $80 \text{ мОм}$ .
- Напряжение на затворе при тесте:  $20 \text{ В}$ .
- Увеличение только на 20% сопротивления  $R_{DS(ON)}$  при высоких температурах.
- Максимальный ток:  $33 \text{ А}$ .
- Высокая частота переключения.
- Малая паразитная емкость.
- Низкий ток утечки (менее  $1 \text{ мкА}$ ).
- Возможность наращивания мощности за счет параллельного включения приборов.

- Рабочий диапазон температур:  $-55 \dots +125 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Корпус транзистора: TO-247.
- Мощность рассеяния на корпусе:  $150 \text{ Вт}$ .

CMF20120D MOSFET имеет существенные преимущества перед кремниевыми устройствами, включая беспрецедентную системную эффективность — меньший размер, вес и стоимость, благодаря более высокой рабочей частоте. Увеличение скорости переключения MOSFET позволит уменьшить потери во многих приложениях на 50%. По сравнению с лучшим кремниевым IGBT устройством CREE повышает эффективность систем и работает на больших частотах (в 2 раза). Более высокая компонентная эффективность также приводит к более низким рабочим температурам. Объединение этих более низких рабочих температур со сверхнизким током утечки CMF20120D ( $< 1 \text{ мкА}$ ) значительно увеличивает надежность систем. MOSFET CMF20120D ориентирован на высоковольтные приложения, в которых эффективность преобразования энергии является критической.

В конце 2011 года CREE выпустила SiC MOSFET CMF10120D, который отличается от CMF20120D большим  $R_{DS(ON)}$  и меньшей ценой.

### Карбидокремниевые MOSFET против IGBT

Карбидокремниевая технология привнесла значительные усовершенствования в производство MOSFET, сделав их конкурентами кремниевым IGBT-транзисторам, особенно в области высоких напряжений. По сравнению с кремниевыми IGBT-транзисторами карбидокремниевые MOSFET имеют и существенно меньшие потери на коммутацию (рис. 4, 5). MOSFET — униполярные приборы, поэтому не имеют «хвостов» при коммутации, обусловленных рассасыванием неосновных носителей. Благодаря расширенной запрещенной зоне карбидокремниевый транзистор превосходит крем-

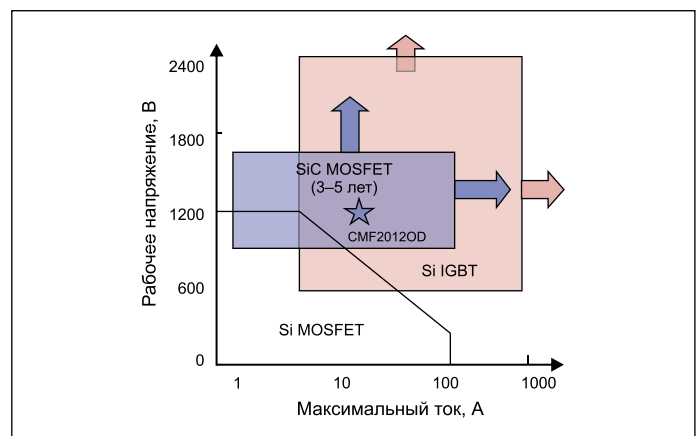


Рис. 4. Область применения SiC MOSFET

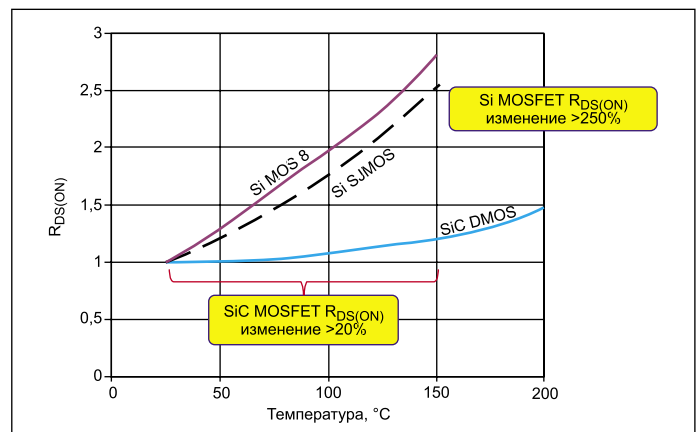


Рис. 5. Зависимость  $R_{DS(ON)}$  от температуры для SiC и кремниевых MOSFET

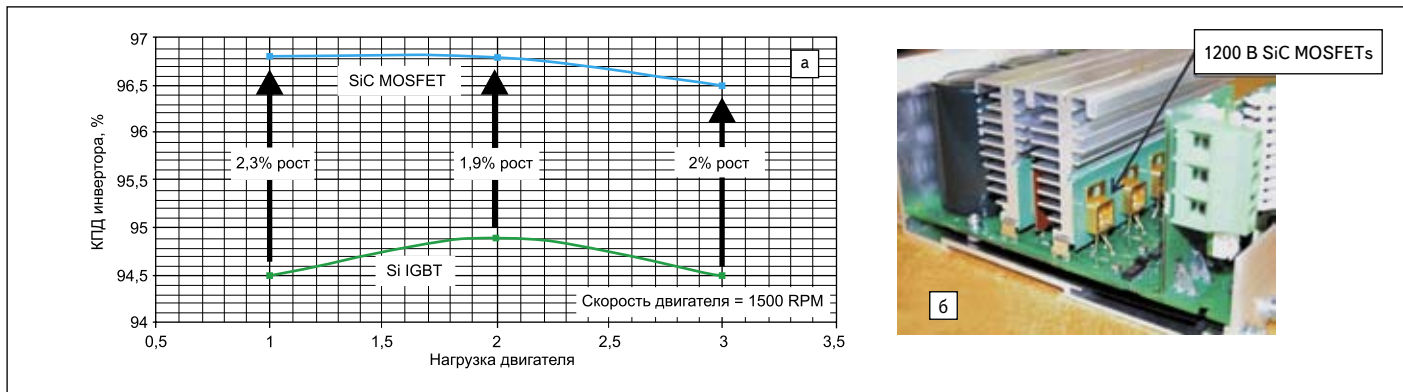


Рис. 6. а) Типичное применение SiC MOSFET; б) привод электродвигателя

ниевые MOSFET. Напряженность электрического поля, при которой происходит пробой, возросла в 10 раз; улучшилась теплопроводность, а следовательно, возросли рабочие температуры. Помимо уменьшения сопротивления  $R_{DS(ON)}$  при нормальных условиях в карбидокремниевых транзисторах значительно снижено влияние температуры. В диапазоне +25...150 °C изменение сопротивления составляет всего лишь 20%. Это очень малое значение по сравнению с аналогичным показателем, равным 200 и даже 300% у кремниевых MOSFET.

### Применение карбидокремниевых MOSFET

CMF20120D компании CREE предназначен для высоковольтных приложений, где эффективность энергопотребления является критической.

Стоит обратить внимание на определенные отличия характеристик кремниевых и карбидокремниевых MOSFET при работе на высоких напряжениях. Эти отличия нужно учитывать, чтобы обеспечить преимущества SiC MOSFET. Несмотря на то, что SiC MOSFET имеют, безусловно, лучшие ключевые характеристики по сравнению с кремниевыми конкурентами, их нельзя рассматривать как прямую замену в существующих приложениях.

Есть две ключевые характеристики, которые нужно иметь в виду при использовании SiC MOSFET: чтобы обеспечить оптимальную крутизну переключения транзистора, следует использовать повышенное напряжение управляющего сигнала на затворе VGS, не менее 20 В. Характеристика переключения прибора представляет собой сопротивление, управляемое напряжением, поэтому и ток является функцией напряжения VDS. В результате переключение происходит при более высоких напряжениях VDS, чем обычно ожидается от кремниевых транзисторов MOSFET и IGBT.

SiC MOSFET можно использовать для преобразователей солнечной энергии, источников питания высокого напряжения и создания ис-

точников питания для промышленных приложений. За следующие несколько лет ключи SiC и диоды найдут применение в управлении электроприводом, электромобилями и в ветроэнергетике. Использование мощных SiC MOSFET совместно с SiC-диодами Шоттки (all-SiC) даст возможность реализовать критические схемы коммутации высокой мощности и системы с уровнями эффективности энергопотребления, размерами и весом, которые не достижимы с любыми коммерчески доступными кремниевыми устройствами питания с аналогичными параметрами.

### Использование SiC-приборов

Инверторы обеспечивают преобразование входного нестабилизированного постоянного напряжения от солнечных батарей в диапазоне 18–90 В в переменное напряжение 220 В бытовой сети 50 Гц. Инверторы переменного напряжения для солнечных батарей (рис. 6) — наиболее эффективное приложение, где MOSFET SiC можно использовать как в демпферах, так и в частях инвертора DC/AC-преобразователей. Потери переключения в инверторе уменьшены больше чем на 30% благодаря использованию MOSFET SiC, а в сочетании с SiC диодами Шоттки была достигнута полная системная эффективность на уровне 99%. Подобная эффективность может быть достигнута в других приложениях, которые требуют высоких запирающих напряжений в комбинации с быстрым, эффективным переключением, таких как промышленные электроприводы, импульсные источники питания, корректоры коэффициента мощности (PFC), демпферы и схемы DC/DC-преобразователей высокой частоты в промышленных и коммуникационных системах.

В дополнение к потенциальному увеличению эффективности низкие потери переключения SiC MOSFET и диодов компании CREE могут позволить оптимизировать частоту переключения до трех раз по сравнению с кремниевыми MOSFET (рис. 7). Размеры индуктивных компонентов зависят от частоты преобразования. Их стоимость уменьша-

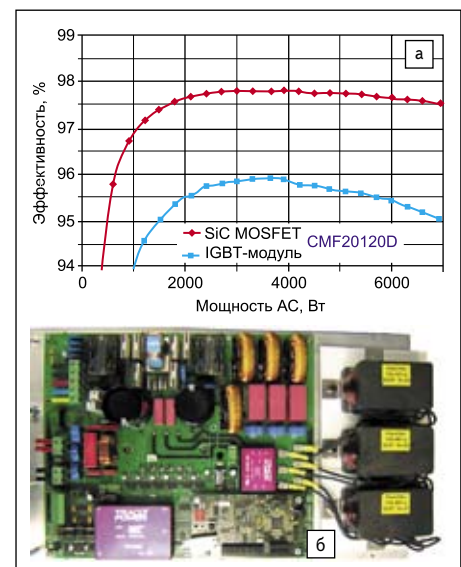


Рис. 7. а) Типичное применение SiC MOSFET; б) 7 кВт 750 В DC link 3-фазный солнечный инвертор

ется примерно на 50% при увеличении частоты преобразования в 2–3 раза. Снижение потерь мощности позволяет уменьшить размеры теплоотводов и в отдельных случаях отказаться от принудительного охлаждения вентиляторами. Это особенно важно для маломощных инверторов. Применение карбидокремниевых MOSFET позволяет уменьшить их температуру на 50%, что приведет к уменьшению размеров и, соответственно, стоимости всего изделия.

### Заключение

До недавнего времени область применения силовой продукции на карбиде кремния была ограничена сегментами, для которых стоимость устройства отходила на второй план по сравнению с техническими параметрами. Компания CREE постоянно совершенствует технологические процессы производства, что приводит к уменьшению стоимости компонентов. Благодаря этому применение силовых приборов на карбиде кремния будет расширяться.