

Силовые приборы компании Cree на основе карбида кремния

Евгения КУРЫШЕВА
e.kyrysheva@compel.ru

Силовые приборы на основе карбид-кремния — высоковольтные диоды Шоттки и MOSFET-транзисторы — находят все более широкое применение в тех секторах, для которых 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 массогабаритные параметры современных силовых систем. Сегодня компания Cree — мировой лидер в производстве монокристаллических подложек из карбида кремния. Она занимает лидирующие позиции и как производитель полупроводниковых приборов на основе SiC.

Введение

Компания Cree Inc. была основана в 1987 году в штате Северная Каролина (США). 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. А 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 1700 В. Компания Cree также производит подложки и эпитаксиальные материалы для других производителей полупроводниковых приборов, а также для исследовательских центров. Мировую известность компании принесла ее разработка мощных светодиодов на подложке из карбида кремния.

В настоящее время в компании Cree сформировалось пять основных подразделений:

- Materials — производство SiC-пластин и эпитаксиальных структур;
- LED Chips — светодиодные кристаллы;
- Xlamp LEDs — мощные светодиоды;

- Power Devices — силовые полупроводниковые приборы на основе SiC, включая высоковольтные диоды Шоттки и MOSFET-транзисторы;
- Wireless Devices — СВЧ-приборы на основе SiC и GaN.

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 и в военной и космической аппаратуре.

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. В частности, их использует компания Advanced Power Technology для производства своих карбидокремниевых приборов.

Качество готовой продукции в большей мере обеспечено многими факторами: качеством подложки (отсутствие дефектов кри-

сталлической 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 в настоящее время 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 компания Cree разработала технологию подложек размером уже 150 мм. Использование подложек большего размера позволит увеличить технологичность процессов и уменьшить себестоимость продукции. В настоящее время большая часть подложек из карбида кремния используется компанией Cree для производства мощных светодиодов.

Применение силовых полупроводниковых приборов на основе карбида кремния дает несомненный выигрыш в эффективности преобразования энергии, а также уменьшение массогабаритных 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 довольно дорогой. Требуется обеспечить высокий уровень бездефектности кристаллической структуры. Высокая цена SiC-приборов пока ограничивает сферы их применения. Однако реализация программы уменьшения потребления электроэнергии бытовыми и промышленными потребителями в рамках энергосберегающих технологий будет неуклонно приводить к расширению сферы применения карбидокремниевых силовых приборов.

Свойства карбида кремния

Карбид кремния — единственное полупроводниковое бинарное соединение AIVBIV. Ширина запрещенной зоны для кристаллов 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 его основе 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, а при комнатной температуре химически взаимодействует с ортофосфорной кислотой и смесью азотной и фтористоводородной кислот при температуре 200 °С. Ввиду большой твердости подложки из карбида кремния очень плохо поддаются механической обработке. Очень трудно обеспечить качество подложек, соответствующее уровню дефектности кремния.

Применение подложек карбида кремния

Монокристаллический SiC используют для изготовления радиационно-стойких светодиодов, обладающих очень высокой надежностью и стабильностью работы. Его можно использовать для изготовления высокотемпературных силовых полупроводниковых приборов, полевых транзисторов, туннельных диодов, счетчиков частиц высокой энергии, терморезисторов, а на основе пленок аморфного SiC — светодиоды и солнечные элементы. SiC — перспективный полупроводниковый материал для высокотемпературной и высокочастотной электроники. На основе карбида кремния создаются высоковольтные диоды, MOSFET-транзисторы, IGBT-транзисторы и тиристоры с рабочим напряжением до 10 кВ. Широкому внедрению приборов силовой электроники на основе SiC препятствуют сложность получения высоко-

качественного исходного материала и эпитаксиальных пленок (проблема микропор — micropipes), а также их высокая стоимость, сложность и дороговизна технологических процессов осаждения, ионной имплантации, плазмохимии и т. п. Сегодняшний уровень разработок и производства позволяет получать исходный SiC в пластинах диаметром до 100 мм с плотностью дефектов до 5 см⁻².

Силовые приборы Cree

Компания Cree — мировой лидер в производстве мощных диодов на карбиде кремния (SiC), 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).
- Большая ширина запрещенной зоны, обеспечивающая меньший ток утечки диодов Шоттки.
- 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·см².

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 рабо-

те преобразователя, и уменьшить габариты фильтров по питанию. Высокая плотность мощности — пожалуй, главное преимущество SiC-диодов и MOSFET над обычными кремниевыми устройствами.

Карбидокремниевые диоды Шоттки

Главное 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 карбидокремниевых 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 приборов Cree Z-Res и ZERO RECOVERY выпрямительных диодов имеют высокое обратное напряжение 600, 650 и 1200 В и ориентированы на приложения, в которых особенно важны низкие потери на переключение.

В этом семействе присутствуют 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 в бескорпусном исполнении.

Бескорпусные диоды компания поставляет фирмам, специализирующимся на создании интегральных силовых модулей, например в качестве антипараллельных диодов для мощных IGBT- или MOSFET-транзисторов.

1700-В силовые диоды находят применение в преобразователях солнечной энергии,

Таблица 1. Карбидокремниевые мощные диоды Шоттки компании Cree

Наименование	IF(AVG) при Tc = 160 °C	VRRM	Корпус
C2D05120A	5	1200	TO-220-2
C2D05120E	5	1200	TO-252
C2D10120A	10	1200	TO-220-2
C2D10120D	10	1200	TO-247-3
C2D20120D	20 (2x10)	1200	TO-247-3
CPW2-1200-S050B	50	1200	Chip
CPW3-1700-S010B	10	1700	Z-Rec Chip
CPW3-1700-S025B	25	1700	Z-Rec Chip
C3D02060A	2	600	TO-220-2
C3D02060E	2	600	TO-252
C3D02060F	2	600	TO-220 Full Pack
C3D03060A	3	600	TO-220-2
C3D03060E	3	600	TO-252
C3D03060F	3	600	TO-220 Full Pack
C3D04060A	4	600	TO-220-2
C3D04060E	4	600	TO-252
C3D04065A	4	650	TO-220-2
C3D06060A	6	600	TO-220-2
C3D06060G	6	600	TO-263
C3D06065A	6	650	TO-220-2
C3D08060A	8	600	TO-220-2
C3D08060G	8	600	TO-263-2
C3D08065A	8	650	TO-220-2
C3D10060A	10	600	TO-220-2
C3D10060G	10	600	TO-263
C3D10065A	10	650	TO-220-2
C3D20060D	20	600	TO-247
CSD01060A	1	600	TO-220-2
CSD01060E	1	600	TO-252
CSD10030A	10	300	TO-220-2
CSD10120A	10	1200	TO-220-2
CSD10120D	10	1200	TO-247

приводах электропоездов, промышленных электроприводах, преобразователях напряжения ветрогенераторов.

Спротивление 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 °C падение напряжения составляет 1,5 В. При увеличении температуры ток уменьшается при том же значении 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 °C составляет менее 50 мкА, а при увеличении температуры до 200 °C ток утечки увеличивается всего лишь до 70 мкА, что незначительно для такого широкого диапазона температур.

Использование 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 КKM (рис. 1), 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 в ключевом транзисторе и диоде, а также требует увеличения размеров теплоотвода. На рис. 1 показана типовая схема классического активного корректора коэффициента мощности.

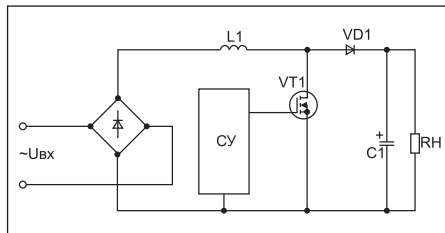


Рис. 1. Типовая схема классического активного корректора коэффициента мощности

Эксперименты показали, что простая замена кремниевых диодов на SiC-диоды Cree позволяет снизить тепловые потери в КKM почти вдвое.

Помимо корректоров коэффициента мощности (рис. 2), 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 (табл. 2). 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 от фирмы Cree — это идеальные вы-

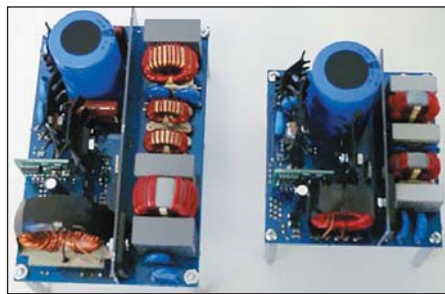


Рис. 2. Корректор мощности: а) на кремниевых силовых компонентах, работающих на частоте 80 кГц; б) на карбидокремниевых диоде и транзисторе, работающих на частоте 200 кГц

Таблица 2. Сравнение базовых параметров силовых модулей с использованием импульсного преобразования на различных частотах

Параметр	80 кГц	200 кГц	Выигрыш
Площадь печатной платы	154 см ²	95,5 см ²	38%
Объем модуля	782,8 см ³	485,1 см ³	38%
Вес модуля	521,6 г	294,8 г	44%
Плотность энергии	0,64 Вт/см ³	1,03 Вт/см ³	61%

соковольтные полупроводниковые выпрямительные диоды Шоттки. Диоды на основе карбида кремния (SiC) 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 В, начинают использоваться вместо кремниевых диодов в бустерной части, работающей с постоянным напряжением, и скоро их будут внедрять в инверторную часть коммерчески доступных систем.

Z-FET CMF20120D — первый промышленный SiC MOSFET

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.

- Полярность транзистора: *n*-канальная.
- Предельное напряжение питания: 1200 В.
- Управляющее напряжение на затворе Vgs max: 25 В.
- Сопротивление открытого канала: не более 80 мОм.
- Напряжение на затворе при тесте: 20 В.
- Увеличение только на 20% сопротивления RDS(ON) при высоких температурах.
- Максимальный ток: 33 А.
- Высокая частота переключения.
- Малая паразитная емкость.
- Низкий ток утечки (менее 1 мкА).
- Возможность наращивания мощности за счет параллельного включения приборов.
- Рабочий диапазон температур: -55... +125 °C.
- Корпус транзистора: TO-247.
- Мощность рассеяния на корпусе: 150 Вт.

По сравнению с кремниевыми MOSFET- или IGBT-транзисторами, имеющими аналогичные параметры, у CMF20120D самый низкий заряд затвора (QG < 100 нC) во всем диапазоне входного напряжения. CMF20120D имеет существенные преимущества перед кремниевыми устройствами за счет высокой системной эффективности прибора, оцениваемой по совокупности ряда параметров: меньшие размер, вес, стоимость, а также более высокая рабочая частота. Увеличение скорости переключения SiC MOSFET позволит уменьшить потери во многих приложениях на 50%. MOSFET CMF20120D ориентирован

на высоковольтные приложения, в которых эффективность преобразования энергии является критической.

Карбидокремниевые MOSFET против IGBT

Карбид-кремниевая 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. 3, 4). MOSFET — униполярные приборы, поэтому не имеют «хвостов» при коммутации, обусловленных рассасыванием неосновных носителей. Благодаря расширенной запрещенной зоне карбидокремниевый транзистор превосходит кремниевые MOSFET. Напряженность электрического поля, при которой происходит пробой, возросла в 10 раз; улучшилась теплопроводность, а следовательно, возросли рабочие температуры.

Помимо уменьшения сопротивления RDSON 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

Стоит обратить внимание на определенные отличия характеристик кремниевых и карбидокремниевых MOSFET при работе на высоких напряжениях. Эти отличия нуж-

но 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 транзисторов Si MOSFET и IGBT. MOSFET SiC можно использовать для преобразователей солнечной энергии, источников питания высокого напряжения и создания источников питания для промышленных приложений. За следующие несколько лет ключи SiC и диоды найдут применение в управлении электроприводом, электромобилями и ветроэнергетике.

Использование совокупности мощных MOSFET SiC совместно с диодами Шоттки (all-SiC) дает возможность реализовать критические схемы коммутации высокой мощности и системы с уровнями эффективности энергопотребления, размерами и весом, которые недостижимы с любыми коммерчески доступными кремниевыми устройствами питания с аналогичными параметрами.

Солнечная энергетика

Солнечная энергетика — отрасль мировой энергетики, связанная с получением полезной энергии путем преобразования солнечного излучения в электроэнергию с использованием полупроводниковых фотоэлементов. Солнечная энергетика (фотовольтаика) — одна из наиболее быстрорастущих отраслей мировой экономики. Большой потенциал роста отрасли и альтернативной энергетики вообще обусловлен такими глобальными факторами, как необходимость обеспечения

национальной энергобезопасности, растущая озабоченность экологическими последствиями использования ископаемых источников энергии, а также их устойчивое удорожание. Солнечная энергетика имеет и ряд уникальных преимуществ: энергия солнца доступна всем, бесплатна, практически неисчерпаема, а процесс ее преобразования в электрическую энергию оказывает относительно небольшое воздействие на окружающую среду.

Кроме того, солнечные фотоэнергетические установки являются модульными, что позволяет создавать генерирующие мощности практически любого желаемого размера и мощности. Они могут работать как при подключении к электросети общего пользования (on-grid или grid-connected), так и отдельно (off-grid). По прогнозам аналитиков и участников рынка, к 2015 году рынок фотовольтаики достигнет 14–26 ГВт, при этом среднегодовые темпы роста (CAGR) составят 17–32% (в зависимости от масштабов государственных программ развития отрасли). Среднегодовые темпы роста производственных мощностей по всей производственной цепочке в 2010–2015 годах составят 20–30%.

Автономные системы уже практически конкурентоспособны по сравнению с имеющимися альтернативами: дизельными генераторами или возможностью подключения к общей электросети. Подключение к общей сети требует существенных капиталовложений. Поэтому автономные системы часто являются наиболее подходящим вариантом для снабжения электроэнергией отдаленных районов.

Использование SiC-приборов в солнечной энергетике

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. 5) — 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 использова-

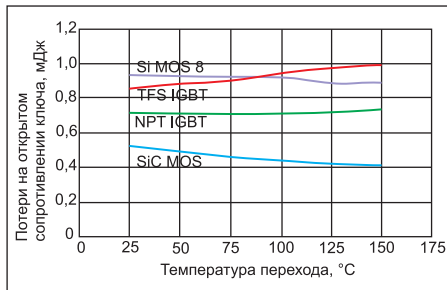


Рис. 3. Сравнение потерь мощности на открытом ключе для различных технологий

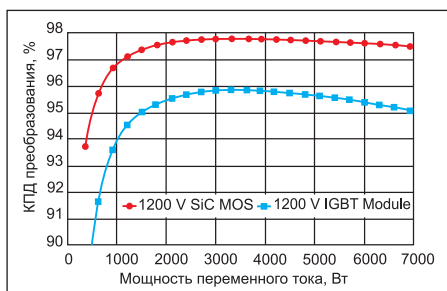


Рис. 4. Сравнение потерь в 1200-В MOSFET и IGBT

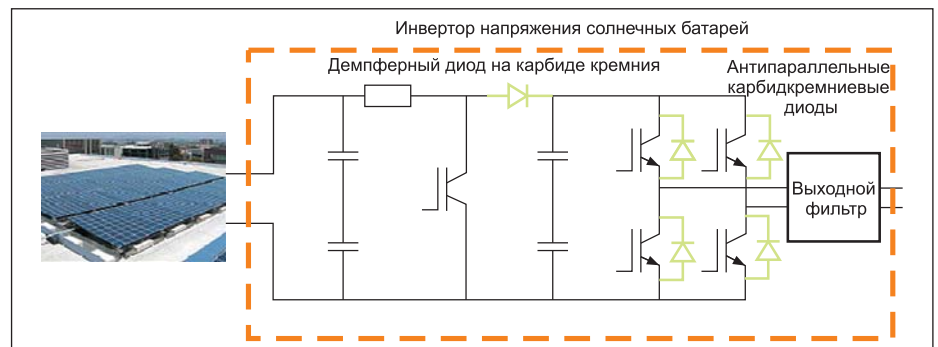


Рис. 5. Использование карбидокремниевых диодов в инверторах солнечных батарей

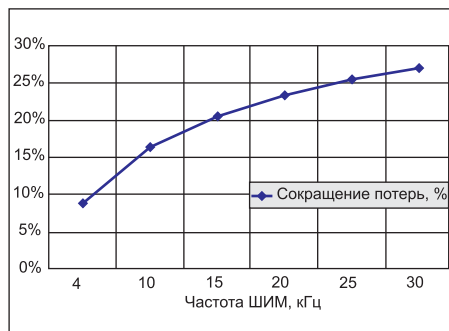


Рис. 6. Сокращение мощности рассеяния в инверторе при увеличении частоты

нию 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. 6).

Размеры индуктивных компонентов зависят от частоты преобразования. Их стоимость уменьшается 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 охлаж-



Рис. 7. Домашняя автономная солнечная энергосистема

дения 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.

Инверторы для автономных и сетевых энергосистем

Автономные энергосистемы на основе солнечных батарей используются для энергообеспечения отдельно стоящих домов (рис. 7), снабжение которых энергией от сетевых источников невозможно или затруднено. В автономной системе энергообеспечения применяются солнечные батареи мощностью до 10 кВт.

Система включает в себя: солнечные батареи, резервные аккумуляторы, инвертор 220 В/50 Гц и контроллер. Более мощные инверторы напряжений используются в мощных фотоэлектрических электростанциях (рис. 8).

Литература

1. Agarwal A. et al. 600 V, 1–40 A Schottky Diodes in SiC and Their Applications, Cree, Inc.



Рис. 8. Фотоэлектрическая электростанция на 2 МВт (вблизи Сакраменто, штат Калифорния)

2. Слабухин А. Ф. Диоды с барьером Шоттки на основе карбида кремния в корректорах коэффициента мощности // Компоненты и технологии. 2005. № 2.
3. CMF20120D-Silicon Carbide Power MOSFET 1200V 80 mΩ Z-FeT™ MOSFET N-Channel Enhancement Mode.
4. Майкл О'Нейл. Устройства на основе карбида кремния повышают КПД систем преобразования солнечной энергии // Силовая электроника. 2009. № 1.
5. Майкл О'Нейл. Карбид-кремниевый MOSFET бросает вызов IGBT // Электронные компоненты. 2008. № 12.
6. Полищук А. Высоковольтные диоды Шоттки из карбида кремния в источниках питания с преобразованием частоты // Компоненты и технологии. 2004. № 5.
7. Петропавловский Ю. Современные полупроводниковые приборы на основе карбида кремния фирмы ROHM Semiconductor // Компоненты и технологии. 2011. № 4.
8. Richmond J. Application Note: CPWR-AN03, Rev. B. Hard-Switched Silicon IGBTs? Cut Switching Losses in Half with Silicon Carbide Schottky Diodes.