

Диоды на основе SiC

повышают эффективность солнечных энергосистем

Диоды на основе карбида кремния (SiC) достаточно быстро проникли на такой стремительно развивающийся рынок, как повышающие DC/DC-преобразователи и инверторы для солнечной энергетики, что особенно заметно в США и Европе. Так, SiC-диоды Шоттки с номинальными рабочими напряжениями 1200 В и 1700 В, которые выпускает основанное в 2015 г. и специализирующееся в области этой технологии подразделение Wolfspeed компании Cree, успешно используются в повышающих преобразователях для формирования шины DC-link вместо кремниевых PiN-аналогов и широко применяются в инверторах коммерчески доступных систем солнечной энергетики.

**Майкл О'Нил
(Michael O'Neill)**

**Перевод и дополнения:
Владимир Рентюк**

Как полупроводник SiC известен еще с начала XX в., но проблема его использования упиралась в механические свойства этого материала (высокую твердость и хрупкость) и технологические проблемы, возникающие при изготовлении подложек. Однако улучшение качества материала, уменьшение размеров и стоимости приборов на его основе, которые наблюдаются за последние десять лет, сделали SiC реальной и, главное, жизнеспособной заменой обычного кремния в силовых устройствах. Специалистам компании Cree, которую смело можно назвать одной и ведущих среди первопроходцев коммерческого использования SiC в качестве полупроводникового материала, удалось снизить плотность дефектов и увеличить размеры кристаллов SiC, тем самым увеличив качество подложки и эффективность выращиваемых на ней структур.

Cree является мировым лидером в производстве этой продукции, охватывая более 90% мирового рынка SiC-пластин. Она первая освоила выпуск пластин диаметром 75 мм, а в настоящее время в серийном производстве на заводах компании продолжается переход с пластин диаметром 100 мм уже на рекордный для технологии SiC размер пластин 150 мм (первая такая заготовка была продемонстрирована в середине 2010 г.), что

резко снижает стоимость кристаллов. Дело в том, что с увеличением размера пластины уменьшается не только плотность дефектов, но и затраты на материалы, поскольку на одной заготовке получается большее количество готовых полупроводниковых кристаллов.

Благодаря собственным разработкам ряда компаний, в том числе и Cree, на базе технологии SiC доступны устройства с большими рабочими токами, которые с успехом могут использоваться в более мощных системах питания. Прорыв технологии на основе SiC связан с тем, что она обладает множеством уникальных свойств, которые делают SiC почти идеальным материалом для работы при высоких напряжениях и высоких температурах. Как известно, теплопроводность SiC в несколько раз выше, чем у арсенида галлия, и более чем в три раза выше, чем у кремния. Именно это и позволяет изготавливать устройства с высокой плотностью тока при одинаковых размерах кристалла. Кроме того, напряженность электрического поля пробоя у SiC почти в десять раз превышает аналогичную напряженность пробоя кремния, поэтому эквивалентная конструкция, выполненная на базе SiC, будет иметь десятикратное увеличение номинального обратного рабочего напряжения по отношению к устройству на базе кремния. Благодаря этому теперь стало возможно создать сверхвысоковольтные диоды Шоттки. Наконец, SiC представляет собой материал с большой шириной запрещенной зоны и, благодаря этому, обладает способностью работать при значительно более высоких температурах, чем любое кремниевое устройство. На рис. 1 показаны различия между карбидом кремния (структура 4H-SiC), арсенидом галлия (GaAs) и кремнием (Si) в части теплопроводности, критической напряженности электрического пробоя и ширины запрещенной зоны.

Для Si-диодов с рабочим напряжением до 1200 В требуется создание слоя полупроводника толщиной не менее 120 мкм. Это связано с тем, что критическая напряженность для Si составляет порядка 0,3 МВ/см.



Для SiC критическая напряженность превосходит аналогичный показатель Si более чем в 10 раз и составляет 3,5 МВ/см. Это значит, что для SiC-диода с рабочим напряжением 1200 В необходимая толщина полупроводникового слоя оказывается уже не 120 мкм, а в 10 раз меньше. Как следствие, это приводит к значительному снижению сопротивления в открытом состоянии R_{on} . Так, при напряжении 600 В SiC-диод имеет $R_{on} = 1,4 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$, GaAs-диод — $R_{on} = 6,5 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$, а Si-диод — $R_{on} > 70 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$. Именно малое удельное сопротивление в открытом состоянии, в сочетании с высокой плотностью тока и теплопроводностью, позволяет использовать очень маленькие по размерам кристаллы для силовых приборов на базе SiC.

Компания Cree использует SiC для производства высоковольтных диодов Шоттки с 2001 г., когда она представила первый коммерческий SiC-диод. Кроме сказанного выше, причина выбора именно диодов Шоттки заключается в том, что они, являясь, по сути, униполярными устройствами, имеют целый ряд явных преимуществ. У таких диодов отсутствует диффузия, связанная с инжекцией неосновных носителей, т. е. они работают только на основных носителях, а их быстродействие определяется только уровнем барьерной емкости (рис. 2).

Как следствие, у них очень малый заряд обратного восстановления. Однако, как известно, диоды Шоттки характеризуются повышенными (относительно обычных кремниевых PiN-диодов) обратными токами, возрастающими с ростом температуры кристалла, и малой устойчивостью к перегрузкам, что является их косвенным недостатком.

Как уже было сказано выше, диоды Шоттки характеризуются чрезвычайно малым зарядом емкости перехода. Величина этого заряда, по сравнению с эквивалентным зарядом обратного восстановления относительно обычных кремниевых PiN-диодов, пренебрежимо мала: так, для 10-А диодов с номинальным напряжением 1200 В она находится на уровне 56 нКл. И она, в отличие от кремниевых PiN-диодов, не зависит ни от температуры, ни от прямого тока, ни от скорости переключения тока di/dt . Кроме того, диоды Шоттки также имеют нулевое прямое напряжение восстановления, так что они включаются практически мгновенно.

Присущие диодам Шоттки характеристики переключения дают еще и преимущества в части значительного уменьшения уровня электромагнитных помех (ЭМП). Эти устройства практически исключают коммутационные потери (потери на переключение) в системе преобразования энергии, что, в свою очередь, значительно снижает потери при включении в соответствующих ключах, которые в противном случае должны коммутировать обратные токи восстановления, связанные с кремниевыми приборами на PiN-переходах. Благодаря повышенной эффективности и производительности SiC-диоды Шоттки являются оптимальным решением для энергетических систем, использующих солнечные панели для выработки электроэнергии.

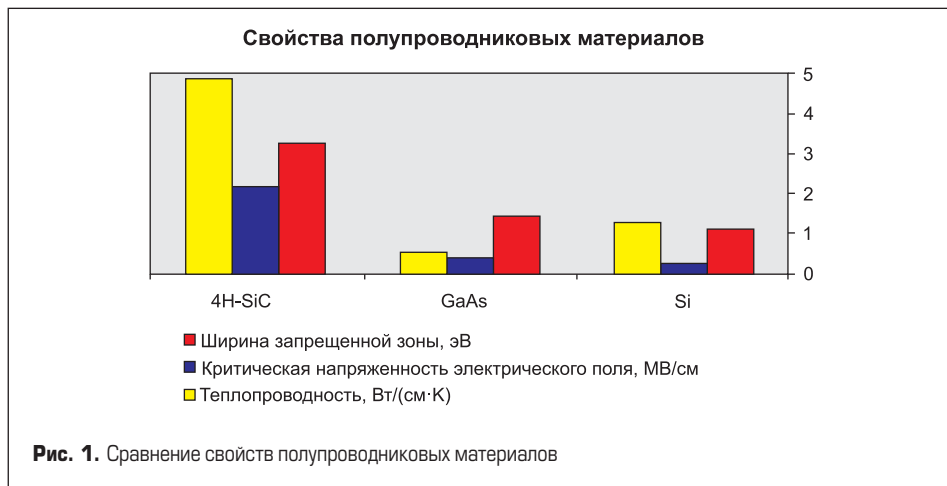


Рис. 1. Сравнение свойств полупроводниковых материалов

Экспертная оценка, полученная автором оригинальной статьи из доступных источников, показывает, что на долю электроэнергии приходится 39% общего мирового потребления энергии. Ожидается, что в США в течение следующих десяти лет спрос на энергию возрастет на 19%, а в развивающихся странах этот показатель будет расти еще быстрее. С этой целью Европа уже воспользовалась преимуществами солнечной энергии, и некоторые страны предлагают дополнительные стимулы для бизнеса и отдельных лиц, поощряя их переход на использование солнечной энергии. Многие производители оборудования для солнечной энергетики, именно благодаря

общему повышению эффективности систем при использовании SiC-диодов Шоттки, обращаются к этой технологии.

Как известно, солнечные батареи собирают солнечную энергию и преобразуют ее в положительное постоянное напряжение. Уровень этого напряжения зависит от интенсивности солнечных лучей, которые падают на фотоэлектрические панели. Это напряжение повышается до уровня промежуточной шины напряжения постоянного тока (DC-link) посредством импульсного повышающего DC/DC-преобразователя с высокой рабочей частотой (рис. 3). SiC-диоды Шоттки

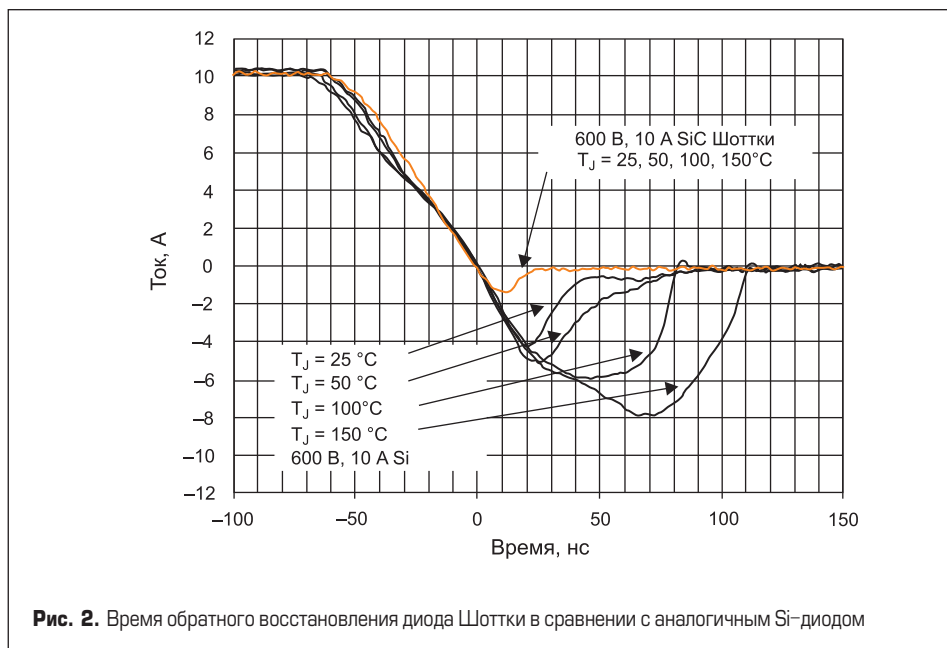


Рис. 2. Время обратного восстановления диода Шоттки в сравнении с аналогичным Si-диодом

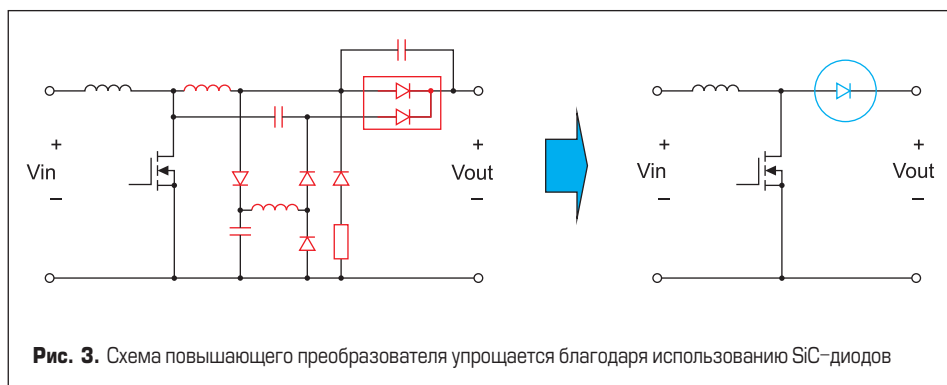
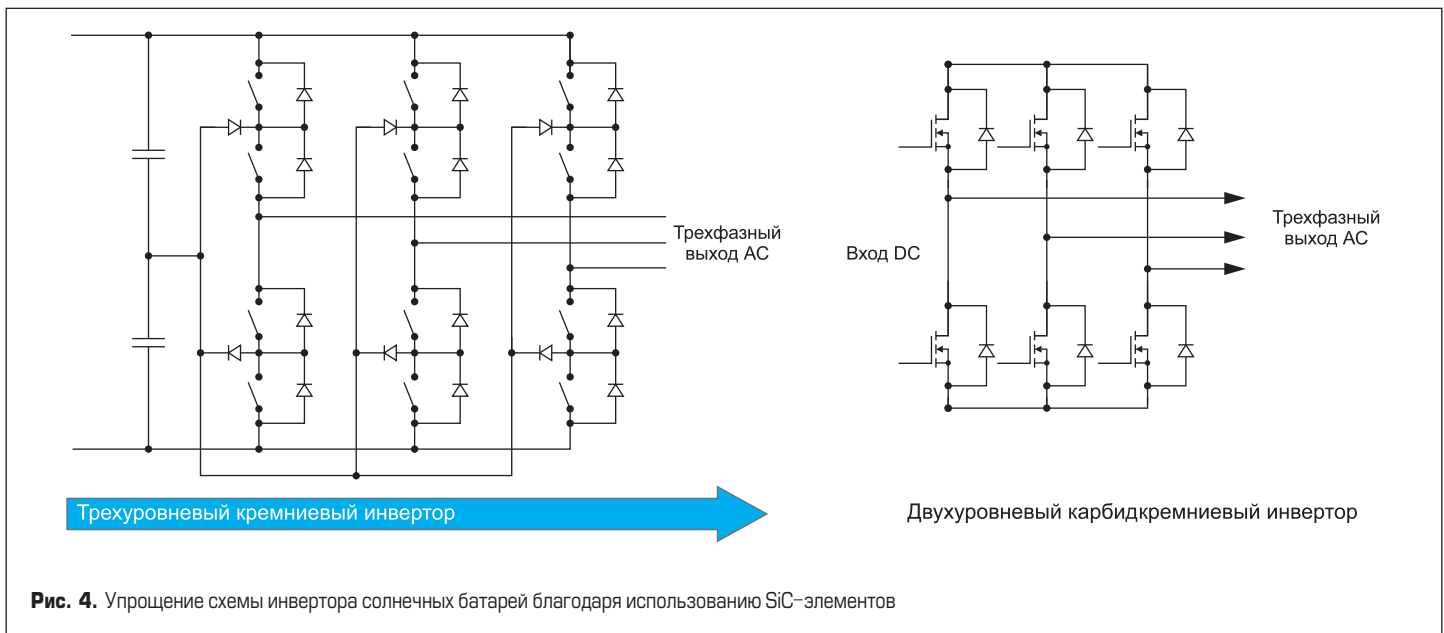


Рис. 3. Схема повышающего преобразователя упрощается благодаря использованию SiC-диодов



компании Cree устраняют коммутационные потери на диодах повышающего преобразователя и значительно уменьшают потери при включении МОП-транзистора или IGBT. Это значительно улучшает эффективность повышающего преобразователя. Затем наступает очередь инвертора, который преобразует стабилизированное напряжение постоянного тока в полезное напряжение переменного тока с фиксированной частотой (обычно 230 В, 50 Гц для Европы и 110 В, 60 Гц для Северной Америки). SiC-диоды Шоттки устраняют коммутационные потери и потери на диодах обратной цепи этой ступени преобразования, а также уменьшают потери при включении IGBT. Все это в сумме значительно улучшает КПД инвертора.

Инверторы с диодами на основе кремния (рис. 4), как правило, более просты в части схемотехнического решения и экономичны, они имеют среднюю эффективность около 96%. Благодаря более эффективной системе на SiC-приборах, в полезную электроэнергию преобразуется большая часть солнечной энергии, которую дают солнечные панели. С диодами на основе SiC средняя эффективность инвертора может быть увеличена до 97,5%. Это означает снижение потерь инвертора до 25%. Принимая во внимание, что солнечные системы рассчитаны на работу в течение, как минимум, 30 лет, это дает существенный выигрыш в энергосбережении. Кроме того, благодаря уменьшению температуры элементов преобразователя, что является следствием снижения потерь, система будет обладать еще и более высокой надежностью.

Использование инверторов с приборами на основе SiC увеличивает плотность мощности до 50%, типовой показатель инверторов на SiC-приборах компании Cree — 7 кВт/кг (рис. 5). Кроме этого, здесь требуется меньшее количество компонентов, уменьшаются габариты системы, снижаются ее сложность и общая стоимость при одновременном обеспечении максимальной эффективности и надежности системы в целом.

Используемые в настоящее время солнечные энергосистемы, как правило, делятся на две кате-

гории: с привязкой к общей сети электроснабжения (grid-tied или on-grid) и функционирующие независимо вне сети общего электроснабжения (off-grid). On-grid система, как уже сказано и как следует из ее названия, связана с общей сетью электроснабжения. В этом случае электроэнергия для конечного пользователя поступает либо от солнечных панелей системы, либо от общей сети электроснабжения. Это связано с уровнем ее потребления, временем суток и т. д. Кроме того, такие системы имеют встроенные системы учета электроэнергии, которые учитывают, какое количество энергии было получено потребителем от сети и сколько выработанной принадлежащими пользователю солнечными панелями энергии было направлено в общую энергетическую систему в периоды низкого собственного потребления мощности. В отличие от систем on-grid, off-grid полностью автономны. При этом они содержат аккумуляторные батареи, а иногда еще и резервный электрогенератор. Солнечные батареи заряжают аккумуляторы через систему заряда, а батареи, при необходимости, обеспечивают питание инвертору, который, в свою очередь, обеспечивает энергией конечного пользователя.

В настоящее время средняя стоимость силовой солнечной электростанции типа on-grid на большинстве рынков мира находится на уровне

ниже \$1,50 за ватт установленной мощности. Таким образом, 10-кВт система без буферных аккумуляторов будет стоить около \$15 000. Очевидно, что более эффективная в части общего КПД система будет означать и более быструю ее окупаемость для потребителя. Опять же, глобальные энергетические проблемы, в частности проблемы экологии и климата, заставляют нас искать и использовать альтернативные источники энергии, а повышение КПД преобразования энергии при использовании приборов на основе SiC дает здесь дополнительную прямую выгоду. На текущий момент, согласно новому исследованию компании IHS Markit (Лондон, Великобритания), снижение цен на комплектующие для солнечных электростанций может привести к тому, что комплектные цены на крупные солнечные электростанции в 2017 г. упадут на 38% по сравнению с 2016 г. Не последнюю роль в этом могут сыграть и современные полупроводниковые приборы, так как основная стоимость оборудования для солнечной энергетики смещается от стоимости солнечных фотоэлектрических панелей, как это было еще 5–10 лет назад, в сторону стоимости преобразователей и инверторов.

Крупнейший в мире рынок для систем солнечной энергетики сейчас сложился и в Европейском Союзе, в частности в Германии. Отчасти это связано с тем, что в этой стране при оплате коммунальных услуг клиента стимулируют покупкой его избыточной мощности, причем по ценам в три раза выше, чем те, которые он платит за традиционную электроэнергию, получающую от общей энергосети. Когда оборудование клиента генерирует электроэнергию от его солнечной системы, в случае если он сам не использует эту энергию, система учета коммунальных услуг позволяет клиенту направить эту энергию обратно в общую электрическую сеть. При этом энергопоставляющая компания будет платить клиенту за ту мощность, которую он ей дал. По этой причине в Германии период окупаемости солнечной системы значительно короче, чем в других странах.



Хотя, как было сказано, на настоящий момент самый большой рынок солнечной энергии находится в Европе, он растет и расширяется во всем мире. Многие развивающиеся страны обращаются к солнечной энергии как к жизнеспособному источнику. С ужесточением требований экологических норм и ростом цен на энергию, солнечная электроэнергетика может получить самое широкое распространение в США, причем скорее, чем мы думаем. В 2016 г. мощность введенных в действие солнечных электростанций в США возросла на 95% и составила 14,5 ГВт. Об этом говорят статистические данные, опубликованные изданием SEIA. В США солнечные батареи активно используются как в жилых домах (около 53% всех мощностей), так и в производственных помещениях. В ряде штатов, лидером среди которых является Калифорния, источники солнечной энергии закладываются уже на стадии проектировки зданий.

Не отстают от нее Аризона и Невада, которые уже предлагают стимулы для перехода на солнечную энергию. Потребители могут значительно выиграть от таких программ из-за того количества солнечного света, которым они, благодаря своему географическому положению и климатическим условиям, обладают. Компания Cree на протяжении уже более десяти лет предоставляет высоковольтные диоды Шоттки для этого и ряда других рынков, а для того, чтобы удовлетворить будущие потребности своих клиентов, она постоянно работает над расширением линейки предлагаемых ею продуктов.

Производители солнечных панелей постоянно стремятся разработать более эффективный продукт. Это связано с тем, что эффективность обычно используемых в них фотоэлектрических преобразователей, которая еще совсем недавно находилась в пределах от 15 до 20%, увеличилась благодаря использованию многослойных технологий до 46%. При этом стоимость обычных панелей солнечных батарей упала до 50 центов/Вт. Показатель эффективности может вырасти еще больше, если принимать во внимание резервы по КПД,

Таблица. Результаты измерений статических параметров

Наименование	Рабочее напряжение V_{RRM} , В	Номинальный рабочий ток I_F , А	Прямое падение напряжения V_F , тип., В		Заряд Q_r , нКл	Корпус
			$T_j=25^\circ\text{C}$	$T_j=175^\circ\text{C}$		
Дискретные корпусированные приборы						
C4D10120A	1200	10	1,5	2,2	52	ТО-220-2
C4D10120D	1200	10	1,4	1,9	56	ТО-247-3
C4D10120E	1200	10	1,5	2,2	51	ТО-252-2
C4D15120A	1200	15	1,6	2,3	78	ТО-220-2
C4D15120D	1200	15	1,5	2,2	37	ТО-247-3
C4D20120A	1200	20	1,5	2,2	99	ТО-220-2
C4D20120D	1200	20	1,8	2,2	102	ТО-247-3
C4D30120D	1200	30	1,8	2,2	156	ТО-247-3
C4D40120D	1200	40	1,8	2,2	198	ТО-247-3
C3D10170H	1700	10	1,7	3,0	76	ТО-247-2
C3D25170H	1700	25	1,8	3,2	182	ТО-247-2
Бескорпусные кристаллы						
CPW4-1200-S010B	1200	10	1,5	2,2	51	2,26×2,26 мм
CPW4-1200-S015B	1200	15	1,6	2,3	78	2,7×2,7 мм
CPW4-1200-S020B	1200	20	1,5	2,2	993	3,08×3,08 мм
CPW5-1200-Z050B	1200	50	1,6	2,3	246	4,9×4,9 мм
CPW3-1700-S010B	1700	10	1,7	3,0	96	3,78×2,68 мм
CPW3-1700-S025B	1700	25	1,8	3,2	170	5,7×3,94 мм
CPW5-1700-Z050B	1700	50	1,6	2,5	370	6×6 мм

которые имеются в повышающих преобразователях и инверторах. В текущих условиях они оказывают ощутимое влияние на общую энергоэффективность всей системы в целом, поэтому диоды на основе карбида кремния и играют здесь такую важную роль.

Наука и технологии не стоят на месте. Исследования по разработке все более и более эффективных материалов для фотоэлектрических панелей продолжают. С более эффективными панелями значительно более высокие номинальные мощности будут поставяться с панелей гораздо меньшей площади. Поэтому компания Cree видит сдвиг в потребностях своих заказчиков от сегодняшних, коммерчески доступных диодов с номинальными токами 10–40 А и рабочими напряжениями 1200 В, а также диодами с токами 10 и 25 А на напряжение 1700 В, в сторону больших то-

ков и напряжений. Компания уже сейчас ведет разработку 50-А, 100-А и еще более высокоточных устройств с большим допустимым рабочим напряжением. Фактически сегодня у Cree уже имеется коммерчески доступный 50-А кристалл диода Шоттки (CPW5-1700-Z050B) с номинальным рабочим напряжением 1700 В и размером всего 6×6 мм. С дальнейшими достижениями в технологии SiC и переходом на пластины SiC большего диаметра Cree имеет очень хорошие позиции, чтобы стать ведущим поставщиком этих полупроводниковых приборов будущего. Основные электрические характеристики дискретных SiC-диодов Cree приведены в таблице.

Полная информация по SiC-диодам Шоттки Cree доступна на сайте компании www.wolfspeed.com/power/products/sic-schottky-diodes/table