

# SiC-диоды Шоттки

## в корректорах коэффициента мощности

**Повышение эффективности путем использования высоковольтных SiC-диодов в повышающих преобразователях ККМ может применяться для увеличения выходной мощности и частоты переключения с целью снижения габаритов изделия или повышения его надежности. В то же время использование SiC-диодов Шоттки позволяет уменьшить EMI.**

**Стюарт Ходж-младший (Stuart Hodge Jr.)**

**Валерия Смирнова**

cree@macrogroup.ru

**А**ктивные корректоры коэффициента мощности (ККМ, или PFC) широко используются в современных источниках питания. Государственные стандарты и требования заказчиков должны быть удовлетворены путем грамотного проектирования этих схем. Все чаще эффективность преобразования и плотность мощности являются доминирующими задачами при разработке типовых AC/DC-преобразователей. Проектировщики стремятся ускорить процесс проектирования и одновременно исключить риски. Несмотря на успешное появление новых элементов на полупроводниковом рынке, не всегда понятно, какие преимущества сле-

дует от них ожидать или какие выгоды можно получить в конкретном приложении.

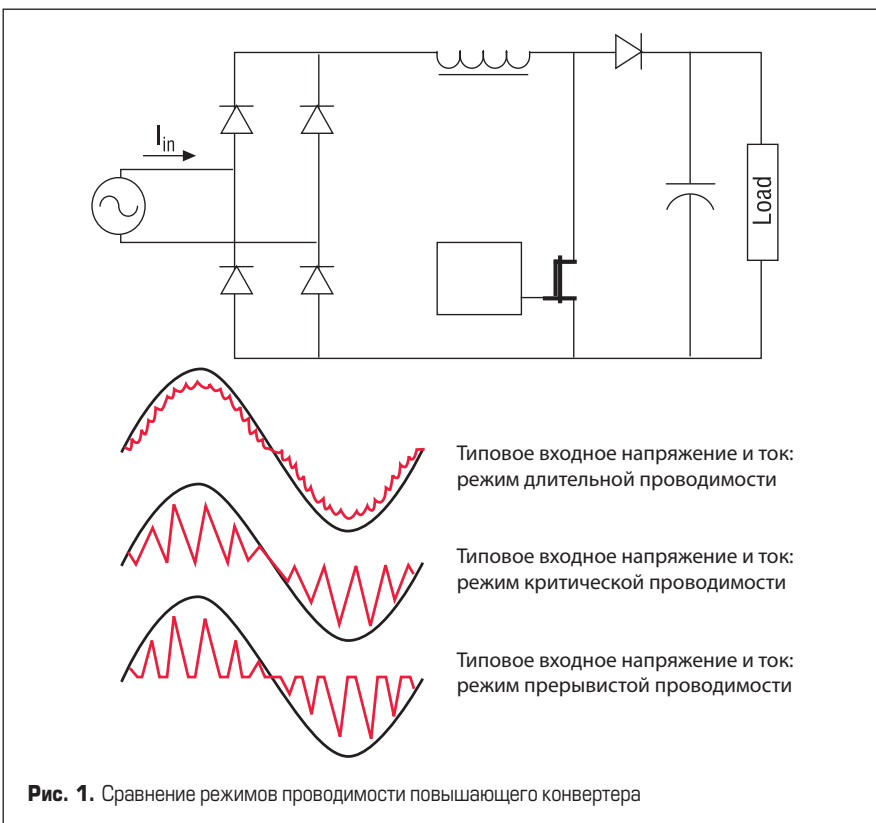
Часто дизайнеру приходится изменять конструкцию изделия, чтобы полностью реализовать преимущества полупроводников следующего поколения. Инженеры хотят прикладывать меньше усилий. В последние годы была проведена большая работа по созданию полупроводниковых приборов на основе новых перспективных материалов. Карбидкремниевые (SiC) диоды Шоттки стали первыми из них, и несомненно, что в будущем появится много новых силовых модулей на основе этого уникального материала.

### Общие сведения о ККМ

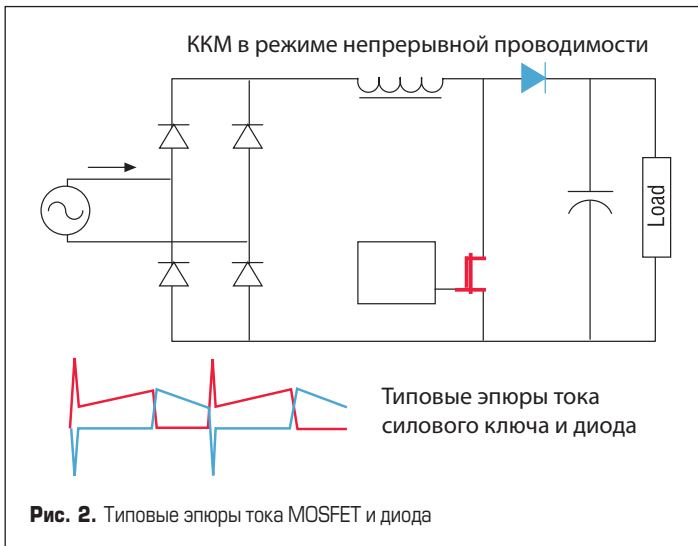
На уровнях мощности выше примерно 200 Вт большинство активных ККМ представляют собой повышающий преобразователь в режиме непрерывной проводимости (CCM). Очевидно, что конвертеры в режиме критической и прерывистой проводимости работают в условиях больших пиковых перепадов токов, поскольку ток дросселя падает до нуля в каждом цикле переключения. На рис. 1 показаны три основных режима проводимости повышающего преобразователя. Режим CCM не только ограничивает пиковую токовую нагрузку, но также упрощает фильтрацию.

Наряду с преимуществами, у режима CCM есть определенные недостатки. Наиболее заметными из них являются большие потери и генерация EMI, что связано с выключением бустерного диода. На рис. 2 показаны типовые эпюры токов MOSFET и диода в повышающем CCM-преобразователе, использующем сверхбыстрый высоковольтный кремниевый выпрямитель. Обратите внимание на то, что ток обратного восстановления диода добавляется к току стока MOSFET. Это приводит к значительному росту рассеиваемой мощности транзистора наряду с увеличением EMI.

Очевидно, что существуют области, где можно добиться улучшения эффективности. Рассмотрим



**Рис. 1.** Сравнение режимов проводимости повышающего конвертера



схему ККМ, передающего мощность 400 Вт при входном напряжении 90 В (AC) и выходном напряжении 400 В. Средний выходной ток составляет 1 А, средний входной ток — 4,94 А; таким образом, средний шунтовой ток будет 3,94 А. Это позволяет сделать вывод, что входной или шунтовой токовый путь является лучшим местом для улучшения эффективности. При этом не совсем понятно, как улучшения в шунтовой цепи можно обеспечить с помощью выходного диода.

Обратившись к рис. 2, мы видим, что восстановление стандартного ультрабыстрого кремниевого (Ultrafast Si) диода создает большой всплеск тока, который должен быть рассеян в шунтовой цепи. Этот скачок может быть даже больше, чем прямой ток диода. Кроме того, этот обратный ток, как и сопротивление открытого канала MOSFET, увеличивается с ростом температуры, что может привести к тепловому пробую.

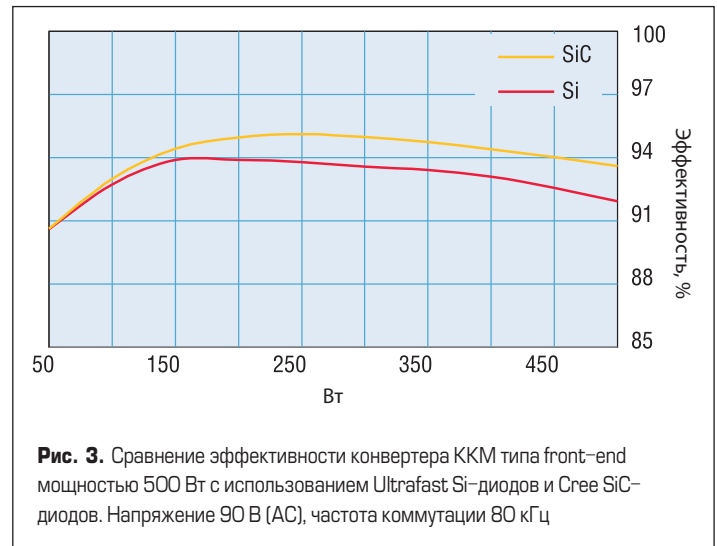
Компания Cree разработала линейку высоковольтных SiC-диодов Шоттки с диапазоном токов 1–20 А при напряжении 600 В, 10–20 А при напряжении 300 В и 5–20 А при напряжении 1200 В. Диоды с напряжением 600 В хорошо подходят для ККМ типа *front-end*. Карбид кремния относится к полупроводниковым материалам с большой шириной запрещенной зоны. Эта характеристика делает его оптимальным вариантом для создания высоковольтных диодов Шоттки. Кроме того, большинство преимуществ SiC-относительно Si-приборов усиливается с ростом температуры.

### Вопросы эффективности

Главным преимуществом SiC-диодов Шоттки является отсутствие тока восстановления, SiC SBD имеют только небольшой накопленный емкостной заряд. Благодаря исключению тока восстановления, эпюры переключения имеют четкие границы, уменьшается «звон» и уровень предсказуемых потерь. Зачастую снабберы, используемые для ограничения тока обратного восстановления и снижения EMI, при этом могут быть устранены. Эффективность — это только одна цель, которую преследует разработчик источника питания. Должны также учитываться стоимость, вес, габариты и электрические характеристики, и правильный дизайн устройства может помочь в достижении этих целей. Кроме того, более эффективная конструкция снижает требования к теплоотводу, что также позволяет снизить размеры, вес и стоимость.

Повышение эффективности дает возможность увеличить выходную мощность устройства без изменения его конструкции. При той же мощности это позволяет снизить требования к системе охлаждения. В конечном итоге это ведет к повышению надежности системы. Таким образом, на самом деле все наши рассуждения посвящены только эффективности.

Чтобы продемонстрировать возможные преимущества SiC, был разработан и протестирован ККМ типа *front-end* мощностью 500 Вт. Были измерены его характеристики при использовании Ultrafast Si-диодов и Cree SiC-диодов Шоттки. Хотя повышение эффективности часто



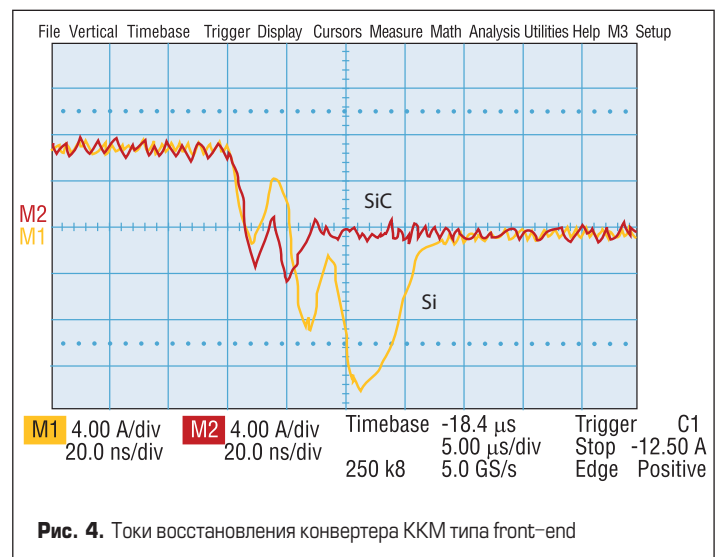
является основной целью разработки, оно может быть использовано для улучшения других характеристик устройства. В частности, это позволяет увеличить частоту коммутации при сохранении прежнего КПД. Повышение частоты дает возможность снизить габариты и вес блока питания. Для оценки этой возможности был разработан и протестирован второй преобразователь, работающий на высокой частоте.

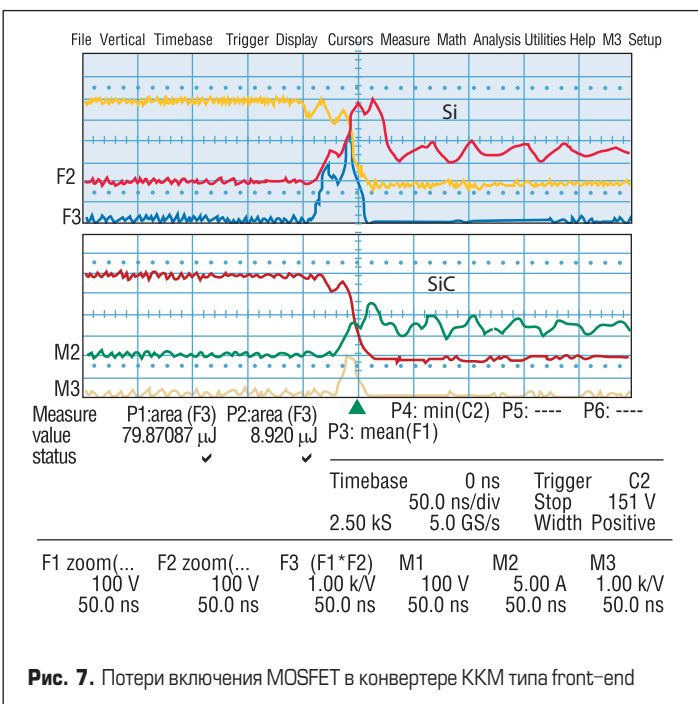
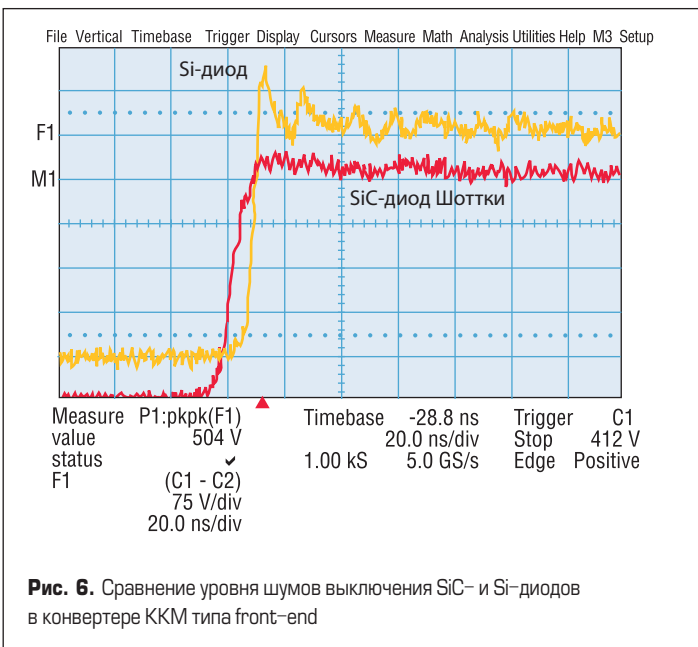
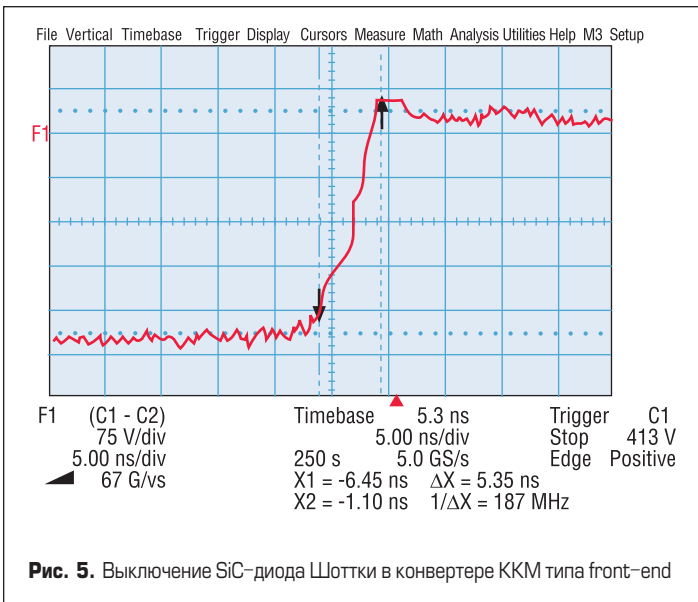
Основные характеристики конвертера ККМ типа *front-end*:

- входное напряжение 90–270 В (AC);
- выходная мощность 500 Вт;
- выходное напряжение 390 В.

Подобная конструкция ККМ является типовой для источников питания, предназначенных для рынка серверов. На рис. 3 показана кривая эффективности конвертера ККМ, измеренная на частоте 80 кГц при низком входном напряжении. Преобразователь предназначен для работы в режиме CCM с пиковым током пульсаций 15% при малом значении  $V_{in}$ . На графике видны улучшения, полученные при использовании SiC-диода. Наибольший КПД наблюдается при максимальной нагрузке, увеличение достигает 2%. Это является прямым результатом снижения токов восстановления, которые максимальны в Si-диоде при больших нагрузках. Для сравнения: заряд восстановления SiC-диода не зависит от прямого тока.

На рис. 4 дано сравнение токов обратного восстановления. Обратите внимание на небольшой обратный ток на эпюре SiC-диода Шоттки, причиной которого является заряд емкости перехода. Очень важно, что этот ток является абсолютно температурно-независимым. Ток обратного восстановления Si-диода, как и сопротивление открытого канала MOSFET, растет с увеличением температуры. Этот рост приводит к увеличению потерь переключения и, в предельном случае, к тепловому пробую.





Также отметим, что скорость изменения тока диода ( $di/dt$ ) составляет около 1500 А/с. Процесс восстановления SiC-диода Шоттки не зависит от  $di/dt$ . В некоторых публикациях ставится под сомнение устойчивость выпрямителей SiC-диодов Шоттки к  $dV/dt$ . В [4] указано, что отказ SiC-диода происходит при подаче одиночного импульса с  $dV/dt$  выше 55 В/нс. В противоположность этому на рис. 5 показан процесс выключения диода Cree ZERO RECOVERY в исследуемом конвертере с перепадом напряжения 67 В/нс. В таком режиме источник питания проработал много часов без проблем.

На рис. 6 можно видеть процесс выключения SiC-диода Шоттки и быстрого Si-диода. Смещение сигнала и момент коммутации сдвинуты для наглядности. Эпюры демонстрируют преимущества «нулевого» восстановления. Отсутствие тока восстановления у SiC-диода обуславливает значительно меньший уровень шумов, что приводит к снижению генерации EMI.

На рис. 7 показано рассеяние энергии в MOSFET-ключе, вызванное восстановлением тока бустерного диода. Потери Si-диода составляют 79,9 мкДж, что соответствует мощности рассеяния 6,4 Вт при 80 кГц и 16 Вт при 200 кГц. Сравните это с данными, полученными при использовании SiC-диодов: 8,9 мкДж или 0,7 Вт при 80 кГц и 1,75 Вт при 200 кГц. Снижение потерь включения составляет почти 90%.

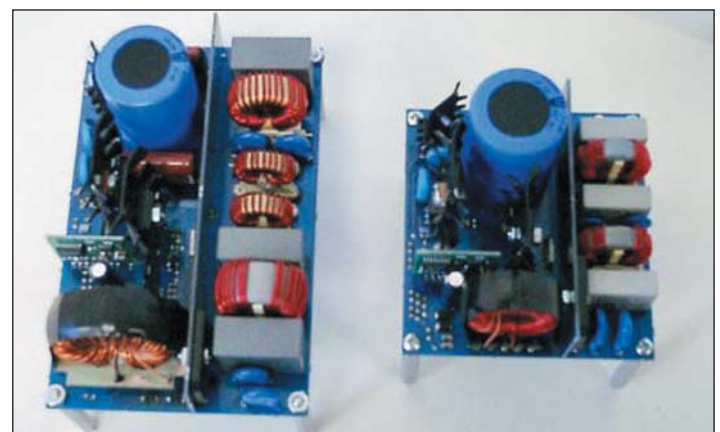
### Высокочастотный режим работы

Как отмечалось ранее, повышение эффективности может быть использовано для повышения частоты переключения силовой системы. Основные цели разработки остаются такими же, как и при проектировании исходного устройства на Si-приборах, а общая частота переключения поднята до точки, в которой КПД обоих устройств одинаков. Увеличение рабочей частоты позволяет уменьшить размеры бустерного индуктора, а также других коммутируемых реактивных элементов.

Сюрпризом может стать возможность снизить размеры входного EMI-фильтра. Большинство таких фильтров, предназначенных для низкочастотных схем ККМ, требуют применения дополнительной дифференциальной индуктивности, чтобы обеспечить затухание на частотах ниже частоты переключения. В отличие от этого в высокочастотных фильтрах индуктивности рассеяния синфазных индукторов зачастую достаточно для обеспечения низкочастотной фильтрации в диапазоне намного ниже рабочей частоты.

Задача увеличения частоты переключения до получения эффективности, аналогичной с кремнием, была решена ценой нескольких проб и ошибок. На более высоких частотах конструкция бустерного индуктора и высокочастотных компонентов фильтра должна быть изменена. Это, в свою очередь, влияет на эффективность. Цель была достигнута, когда эффективность нового конвертера приблизилась к КПД прибора оригинальной конструкции.

На рис. 8 показаны фотографии окончательных вариантов двух ККМ-преобразователей. Видно, что достигнуто значительное умень-



**Рис. 8.** Сравнение габаритов ККМ типа front-end, созданных с применением Si-диодов (слева, частота 80 кГц) и SiC-диодов (справа, частота 200 кГц)

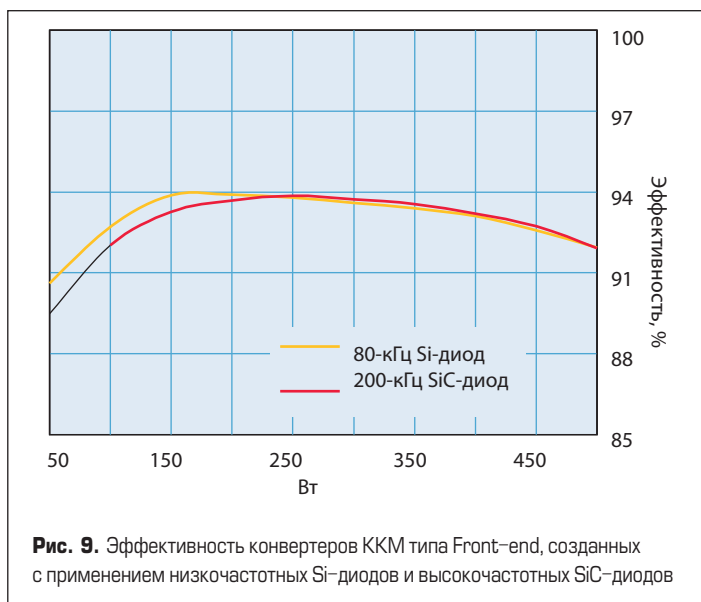
**Таблица 1.** Характеристики низкочастотной (Si) и высокочастотной (SiC) конструкции

	80 кГц	200 кГц	Разница
Площадь РСВ, см <sup>2</sup>	154,1	95,5	-38%
Объем, см <sup>3</sup>	782,8	485,1	-38%
Масса, г	521,6	294,8	-44%
Плотность мощности, Вт/см <sup>3</sup>	0,64	1,03	61,00%

шение размеров нового блока. В таблице 1 перечислены основные сравнительные характеристики низкочастотного и высокочастотного устройства. Новый конвертер не только более компактный, его вес на 44% меньше, чем у низкочастотного преобразователя. Цель работы состояла в проектировании КKM типа *front-end*, обеспечивающего повышение эффективности за счет использования SiC-диода Шоттки и увеличения частоты коммутации.

На рис. 9 показан КПД конвертера, работающего на частоте 80 кГц и созданного с использованием Ultrafast Si-диода, а также преобразователя с бустерным SiC-диодом и частотой коммутации 200 кГц. Кривые, представленные на рисунке, практически совпадают, хотя Si-диод более эффективен при небольшой нагрузке, а SiC-диод Шоттки имеет небольшое преимущество на средних и высоких нагрузках. Сегодня использование высоких частот коммутации в DC/DC-конвертерах становится обычным делом. Благодаря очевидным достоинствам SiC-технологии конвертеры КKM могут получить некоторые дополнительные преимущества от повышения рабочей частоты.

При тщательном электротехническом проектировании и грамотной разводке печатных плат повышение рабочей частоты не только целесообразно, но и улучшает общую производительность системы. Использование КKM-конвертеров типа *front-end* и DC/DC-преобразователей на высокой частоте создает возможность для синхронного режима работы. Такой режим с использованием метода модуляции по фронтам позволяет уменьшить генерацию ЕМИ и снизить пульсирующие токи в высоковольтном конденсаторе.



### Литература

1. Agarwal A., Singh R. et al. 600V, 1-40A Schottky Diodes in SiC and Their Applications. [www.cree.com/ftp/pub/CPWR-AN02.pdf](http://www.cree.com/ftp/pub/CPWR-AN02.pdf).
2. Spiazzi G., Buso S. et al. Performance Evaluation of a Schottky SiC Power Diode in a Boost PFC Application // Power Electronics Specialist Conference Proc. Cairns, Queensland, Australia. June 23-27, 2002.
3. Ben-Yaakov A. and Zeltser I. Benefits of Silicon Carbide Schottky Diodes in Boost APFC Operating in CCM // Power Conversion and Intelligent Motion. Nuremberg, 2001.
4. Acharya K. and Shenai K. On the dV/dt Rating of SiC Schottky Power Rectifiers // Proc. Power Electronics Technology Conference. October, 2002.