

Диоды с барьером Шоттки на основе карбида кремния

в корректорах коэффициента мощности

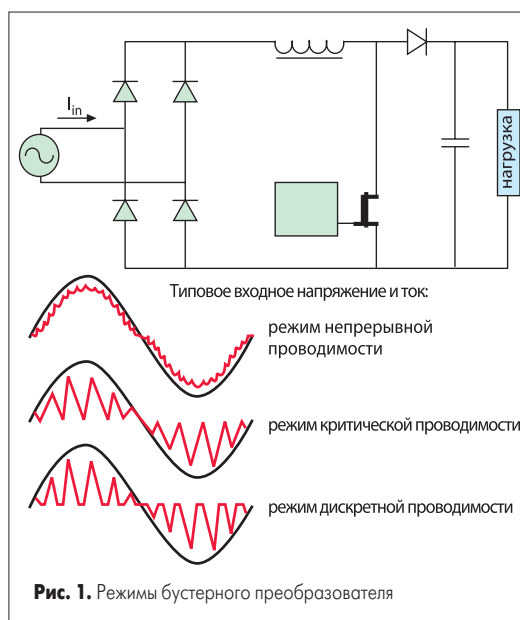
Повышение производительности, достигающееся при использовании высоковольтных выпрямителей на основе карбида кремния в бустерных преобразователях, может использоваться для увеличения выходной мощности, частоты коммутации в устройствах небольших размеров или для повышения их надежности. Диоды Шоттки на основе карбида кремния компании Cree отлично подходят для повышения производительности, к тому же, с их помощью можно значительно понизить электромагнитные помехи.

Александр Слабухин

alex@icquest.ru

Сегодня в силовых источниках питания широко применяется активная коррекция коэффициента мощности. Необходимость корректора коэффициента мощности (ККМ) регламентируется требованиями по электромагнитной совместимости ГОСТ Р 51317-2000. КПД и плотность мощности все больше являются доминирующими факторами при разработке AC/DC-преобразователей. Кроме того, разработчики стремятся ускорить процесс проектирования и уменьшить возможные риски.

На рынке полупроводниковых устройств постоянно появляются новые разработки, но не всегда понятно, как и где новинки могут быть полезны в конкретных применениях. Зачастую, для реализации преимуществ следующего поколения полупроводниковых устройств требуется полностью переработать существующую схему, что бывает непростой задачей для разработчиков.



Несколько лет назад были завершены работы над созданием мощных полупроводников на основе карбида кремния. Диоды с барьером Шоттки стали первыми устройствами, использующими новую полупроводниковую технологию, которая в будущем, несомненно, найдет применение в различных силовых полупроводниковых устройствах.

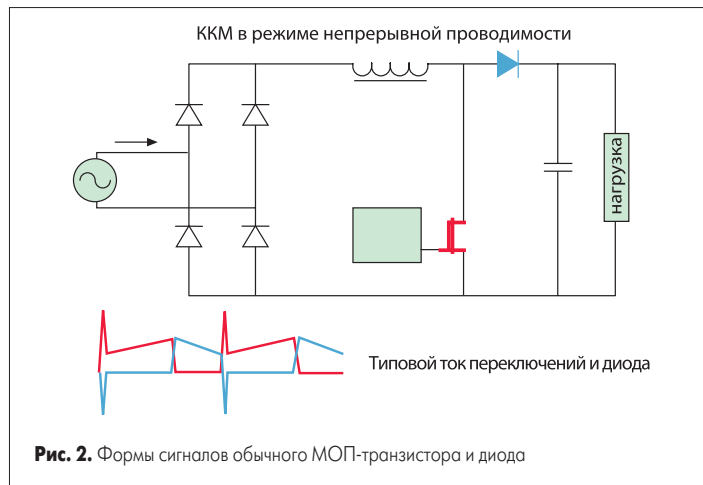
Корректоры коэффициента мощности

При мощностях свыше 200 Вт большинство ККМ организованы как бустерные преобразователи, работающие в режиме непрерывной проводимости (РНП). Не секрет, что преобразователи, работающие в режиме дискретной проводимости, страдают от больших амплитудных всплесков тока, так как индукционный ток падает до нуля при каждом цикле переключения транзистора. На рис. 1 показаны три основных режима бустерного преобразователя. Режим непрерывной проводимости не только ограничивает скачки тока, но и легче фильтруется.

Наряду с достоинствами использования РНП, существуют и некоторые недостатки. Самыми заметными из них являются потери, а также возникновение электромагнитных помех при выключении бустерного диода.

На рис. 2 изображены графики изменения тока МОП-транзистора и диода бустерного преобразователя (РНП), используемого в качестве сверхбыстрого высоковольтного кремниевого выпрямителя. Ток обратного восстановления диода оказывает влияние на ток стока транзистора. Этот ток является причиной значительного рассеивания мощности МОП-транзистора наряду с увеличением электромагнитных помех.

Стало очевидно, что в такой схеме нашлись участки, где необходимо произвести модернизацию для улучшения КПД. Рассмотрим схему ККМ, обладающего мощностью 400 Вт, на вход которого подается переменное напряжение 90 В при постоянном выходном 400 В. Средний выходной ток будет равен 1 А, а входной —



4,94 А. Таким образом, среднее значение шунтирующего тока будет равняться 3,94 А. Можно сделать вывод, что лучшим участком для повышения эффективности может быть или вход преобразователя, или шунтирующий участок цепи. Повысить эффективность на шунтирующем участке можно заменой выходного диода.

Обратимся опять к рис. 2. Мы видим, что ток восстановления стандартного сверхбыстрого кремниевого диода порождает большой всплеск, который должен быть рассеян на шунтирующем устройстве. Этот всплеск может обладать большей амплитудой, чем прямой ток диода. Кроме того, ток обратного восстановления диода, как и сопротивление транзистора в открытом состоянии, повышается с увеличением температуры, что может привести к серьезным отклонениям работы схемы.

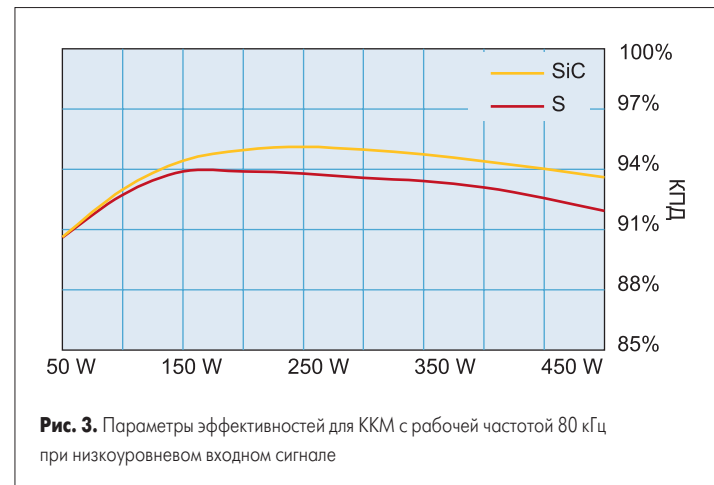
Во избежание подобных условий, компания Cree разработала линию высоковольтных диодов с барьером Шоттки на основе карбида кремния. Доступны модели с диапазоном рабочих токов от 1 до 20 А при напряжении 600 В, от 10 до 20 А при 300 В и от 5 до 20 А при напряжении 1200 В. Линия диодов с рабочим напряжением 600 В отлично подходит для использования в составе ККМ.

Карбид кремния принадлежит к группе полупроводниковых материалов с широкой энергетической запрещенной зоной. Эта характеристика делает его идеальным для создания высоковольтных диодов Шоттки. Кроме того, по большей части преимущества диодов на основе карбида кремния с ростом температуры становятся еще более привлекательными.

Ключевым преимуществом использования диодов Шоттки на основе карбида кремния является отсутствие токов восстановления. Однако карбидокремниевые диоды Шоттки обладают незначительным током заряда емкости перехода. Отсутствие токов восстановления обеспечивает чистые фронты формы сигнала, уменьшает прогнозируемые потери и потери при переходных процессах. В устройствах на основе кремниевых диодов часто используются демфирующие устройства для ограничения токов обратного восстановления и уменьшения выработки электромагнитных помех. При использовании диодов Шоттки компании Cree потребность в них отпадает.

Основная цель, к которой стремятся разработчики источников питания — высокий КПД конечного устройства. Однако разработчик должен помнить еще и о стоимости, весе, размерах и высоких электрических характеристиках разрабатываемой схемы. Только оптимизированное проектирование устройства может помочь решить эти задачи. Кроме того, оптимизированная разработка снижает требования к используемой системе охлаждения, что способствует уменьшению размеров, веса и соответственно общей стоимости устройства. В качестве альтернативы, с помощью повышения эффективности можно увеличить пропускаемую мощность устройства, не меняя его схемотехнику.

При использовании диодов на основе карбида кремния появляется возможность повы-



Об эффективности

снить КПД конечного устройства. Чтобы продемонстрировать это, был разработан и испытан ККМ мощностью 500 Вт. Сначала был измерен КПД преобразователя на основе ультрабыстрых кремниевых диодов, затем на основе карбидокремниевых диодов Шоттки компании Cree. Преимущества преобразователя с диодами на основе карбида кремния были очевидны. Несмотря на то, что повышение КПД зачастую является главной задачей разработки устройства, полученные преимущества могут быть использованы и в других областях. Чаще всего, полученные преимущества используются для повышения частоты коммутации. Увеличение частоты коммутации способствует уменьшению геометрических размеров и веса разрабатываемого источника питания. Для оценки этой возможности был разработан и испытан другой преобразователь, работающий на более высокой частоте коммутации.

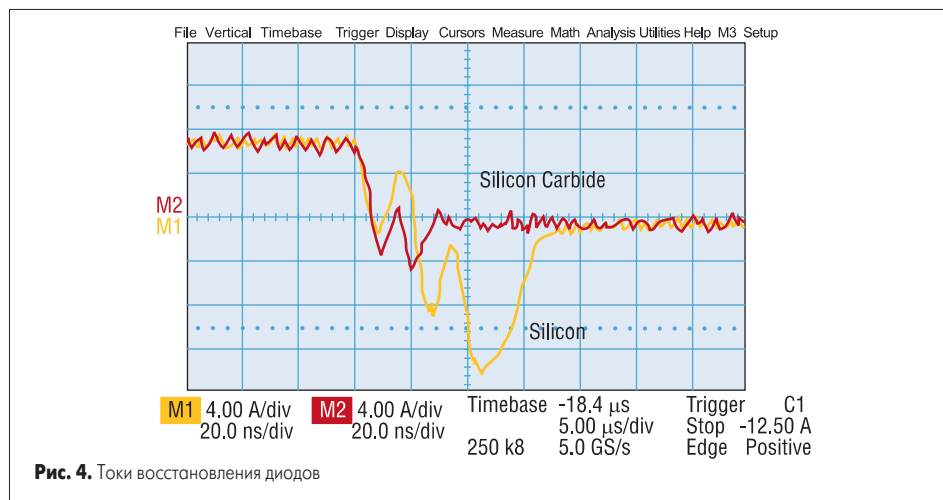
Таблица 1 показывает основные параметры описанных выше преобразователей. Схемы ККМ-преобразователей были построены как типичные устройства источников питания для промышленных применений.

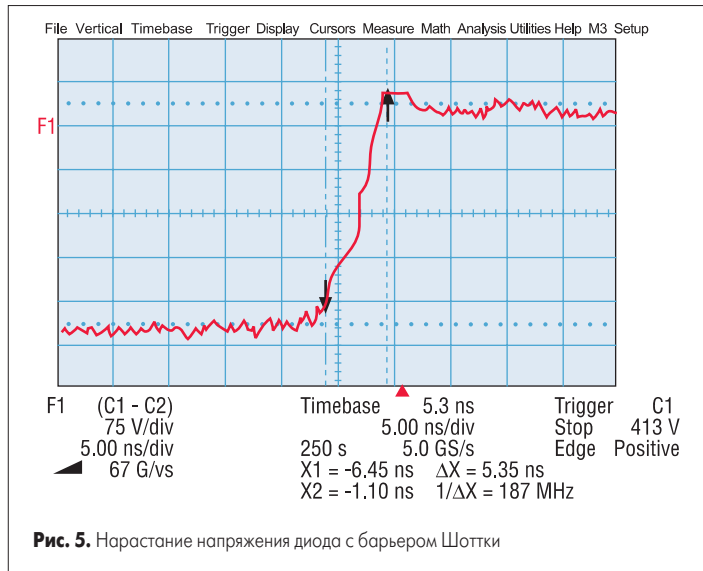
На рис. 3 показаны измеренные параметры КПД для ККМ с рабочей частотой 80 кГц при низком уровне входного сигнала. Преобразователь был спроектирован для работы в режиме РНП, амплитуда пульсирующей составляющей тока составляет 15% от номинального значения низкого уровня сигнала. Как видно из графика, применение карбидокремниевых диодов увеличило КПД на 2%. Это прямой результат уменьшения тока обратного восстановления, который в кремниевых диодах растет с увеличением нагрузки. Для сравнения, ток заряда емкости перехода диодов на основе карбида кремния не зависит от прямого тока диода.

На рис. 4 приводится сравнение токов обратного восстановления диодов. На графике виден небольшой ток обратного восстановления диода Шоттки на основе карбида кремния из-за влияния тока заряда емкости перехода. Специально отметим, что этот ток никак не зависит от температуры.

Таблица 1

Входное напряжение	90–270 В
Выходная мощность	500 Вт
Выходное напряжение	390 В





Ток обратного восстановления в кремниевом диоде, как и сопротивление транзистора в открытом состоянии, постоянно растет с увеличением температуры. Этот рост увеличивает потери на переключение и вероятность теплового пробоя. Также стоит заметить, что параметр di/dt тока кремниевого диода приблизительно равен 1500 А/мкс, в то время как ток карбидокремниевого диода не зависит от di/dt .

Ранее проводилось изучение влияния параметра dV/dt на карбидокремниевые диоды и опытным путем было показано, что в режиме одиночных импульсов свыше 55 В/нс отказа диодов не избежать. Напротив, рис. 5 показывает реальные характеристики выпрямителей Zero Recovery производства Cree, установленных в разработанный преобразователь. Видно, что скорость нарастания входного напряжения составляет 67 В/нс. Данный преобразователь работал на протяжении многих часов, и ни разу не наблюдалось отказа диодов.

На рис. 6 показаны фронты сигнала при выключении диода Шоттки на основе карбида кремния и сверхбыстрого кремниевого диода.

Здесь вы можете наблюдать преимущества отсутствия обратного тока восстановления диода. Диод на основе карбида кремния генерирует существенно меньше шумов, что ведет к уменьшению возникающих электромагнитных помех.

Рис. 7 отображает рассеивание мощности МОП-транзистора, вызванное током обратного восстановления бустерного диода. Потери кремниевого диода составили 79,9 мкДж, которые порождали потери общей мощности 6,4 Вт при частоте 80 кГц и 16 Вт при 200 кГц. Для диода на основе карбида кремния этот параметр равен 8,0 мкДж, то есть 0,7 Вт при частоте 80 кГц и 1,75 Вт при 200 кГц. А ведь это почти 90-процентное уменьшение в потерях при включениях!

Работа в высокочастотных режимах

Как было замечено ранее, улучшение эффективности можно использовать для создания систем питания, работающих с большими частотами коммутации. Основная задача разработки осталась та же, что и для устройства на основе кремниевых диодов, однако ча-

стога коммутации была увеличена до точки, где КПД будет таким же, как у схемы на основе кремниевых диодов. Повышение частоты коммутации способствует уменьшению размеров катушки бустерного преобразователя, как, впрочем, и других частотнокоммутируемых реактивных компонентов.

Но что может оказаться сюрпризом, так это возможность уменьшить размеры входного ЕМI-фильтра преобразователя. Большинству ЕМI-фильтров, используемых в низкочастотных схемах ККМ, необходимо наличие дополнительной дифференциальной индуктивности для обеспечения затухания колебаний ниже частоты коммутации. Напротив, схемы с высокими частотами коммутации зачастую могут использовать индуктивность рассеивания синфазной катушки индуктивности для обеспечения фильтрации частот, которые гораздо ниже частоты коммутации.

Задача повышения частоты коммутации до пределов достижения требуемого КПД была отчасти решена методом проб и ошибок. Поскольку частота повысилась, бустерный индуктор должен быть заменен, а вместе с ним и компоненты для обеспечения высокочастотной фильтрации. Это, в свою очередь, наносит вред эффективности. Цель была достигнута, когда КПД разрабатываемого и исходного преобразователей стали близки.

На рис. 8 показана фотография конечных устройств двух ККМ. Как вы можете заметить, достигнуто значительное уменьшение размеров устройства. В таблице 2 приводится список некоторых основных сравнительных характеристик низкочастотного и высокочастотного преобразователей. Преобразователь,

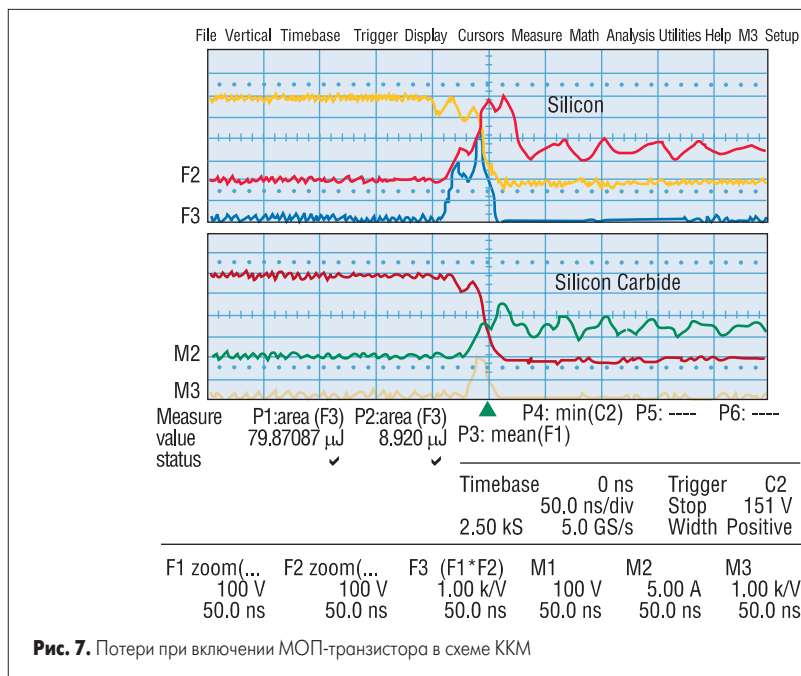
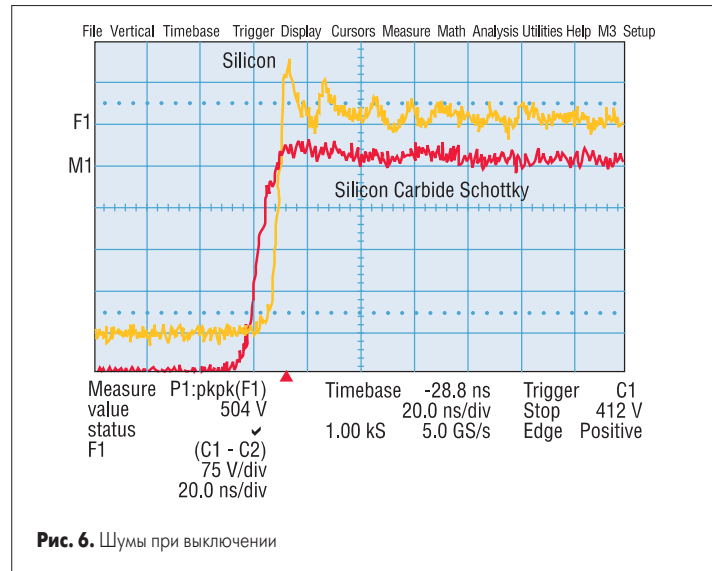


Таблица 2

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

работающий на больших частотах, стал не только меньше по размерам, но и на 44% легче своего низкочастотного аналога.

Задачей проделанной работы было показать, что благодаря применению диодов на основе карбида кремния удалось добиться улучшения КПД, которое позволило повысить частоту коммутации. Рис. 9 показывает КПД преобразователей, построенных на основе кремниевых диодов с частотой коммутации 80 кГц и на основе карбидокремниевых диодов с частотой 200 кГц.

Кривые КПД, показанные на рис. 9, практически соответствуют друг другу, хотя кремниевый диод более эффективен при небольшой нагрузке, а диод на основе карбида кремния

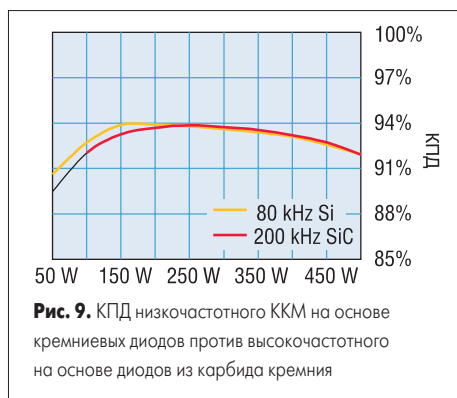


Рис. 9. КПД низкочастотного ККМ на основе кремниевых диодов против высокочастотного на основе диодов из карбида кремния

имеет преимущества при работе со средними и высокими нагрузками.

Заключение

Сегодня высокочастотные режимы работы для DC/DC-преобразователей стали обычным явлением. Благодаря особенностям карбида кремния, уже сейчас ККМ могут обладать до-

полнительными преимуществами при работе в высокочастотном режиме. При достаточной аккуратности разработки схемы и разводки печатной платы надежная работа на повышенных частотах не только резонна, но и позволяет повысить общую производительность системы.

Способность ККМ и последующего DC/DC-преобразователя работать на больших частотах дает дополнительные возможности для согласованного функционирования устройств, которое в свою очередь позволит значительно снизить электромагнитные помехи и токи пульсаций в высоковольтных конденсаторах.

Литература

1. Stuart Hodge Jr. SiC Schottky diodes in power factor correction. Cree Inc.
2. Ranbir Singh, James Richmond. SiC power Schottky diodes in power factor correction circuits.