

ПОСЛЕДНИЕ ПО ПОРЯДКУ, НО НЕ ПО ЗНАЧЕНИЮ

АНДРЕЙ ЕРШОВ, инженер-разработчик

Диоды из-за своего позиционного обозначения часто оказываются в конце перечня элементов, однако их роль в силовых преобразователях далеко не последняя. Все производители тратят немало ресурсов на улучшение процессов изготовления диодов или на создание новых технологий. О двух таких технологиях и пойдет речь в этой статье.

В начале статьи сразу оговоримся, что рассматриваемые в ней технологии не конкурируют друг с другом. Карбидокремниевые (SiC) диоды компании WeEn производятся с нормируемым обратным напряжением 650; 1200 и 1700 В, тогда как диапазон обратного напряжения диодов SBR составляет 20–400 В.

КАРБИДОКРЕМНИЕВЫЕ ДИОДЫ ШОТКИ КОМПАНИИ WEEN

Хотя карбид кремния в силовой электронике применяется более 15 лет, нельзя утверждать, что полупроводниковые приборы на его основе получили самое широкое применения – SiC MOSFET и JFET можно найти далеко не во всех каскадах. В то же время SiC диоды Шоттки встречаются гораздо чаще. Несмотря на их относительную простоту, повышение рабочей частоты и ужесточение требований к эффективности преобразователей вызывает необходимость в улучшении параметров этих диодов.

В самых первых SiC диодах Шоттки использовалась классическая структура барьера Шоттки (Schottky barrier diode, SBD). Затем для уменьшения токов утечки в эту структуру были добавлены *p-n*-переходы, и диоды получили название JBS (Junction Barrier Schottky). И, наконец, самое последнее

слово в совершенствовании SiC диодов Шоттки, – инжекционные диоды Шоттки (Merged PN Schottky, MPS). Новую структуру предложила компания WeEn. Изюминкой диодов Шоттки MPS является возможность выдерживать значительный импульсный ток.

Чтобы лучше понять особенности диодов Шоттки SiC MPS, прежде чем мы перейдем к рассмотрению их особенностей, вкратце опишем особенности SiC полупроводниковых приборов.

Размер MOSFET определяется сопротивлением канала на единицу площади в его открытом состоянии, которое, в свою очередь, зависит от концентрации легирующих примесей и от эпитаксиального слоя. Чтобы уменьшить сопротивление открытого канала, необходимо либо увеличить концентрацию примесей, либо уменьшить толщину эпитаксиального слоя, что приведет к уменьшению сопротивления пробоя.

В соответствии с уравнением Пуассона, напряжение пробоя пропорционально квадрату напряженности электрического поля. Следовательно, благодаря широкой запрещенной зоне карбид кремния, у которого электрическое поле пробоя почти в 10 раз больше, чем у кремния (Si), и одерживает победу над кремнием в высоковольтных силовых приборах. Например, в 600-В SiC

диоде Шоттки толщина эпитаксиального слоя составляет 5 мкм, а концентрация примесей не превышает 10^{16}см^{-3} . В то же время у Si диода Шоттки с аналогичными параметрами толщина эпитаксиального слоя должна быть в 10 раз больше и составлять 50 мкм, а концентрация примесей – 10^{15}см^{-3} . Таким образом, SiC полупроводниковые приборы заметно выигрывают в размерах у кремниевых аналогов, что показано на рисунке 1 [1].

Не менее важным параметром силовых ключей является температурная стойкость. Рассмотрим и этот аспект. Собственная концентрация носителей в Si-приборах при комнатной температуре составляет 10^{10}см^{-3} , а в SiC-полупроводниках при тех же условиях – 10^{10}см^{-3} . При увеличении температуры концентрация носителей растет экспоненциально. При температуре 200°C концентрация носителей в Si-приборах превысит 10^{14}см^{-3} , что соизмеримо с концентрацией в *p-n*-переходе и может привести к необратимому отказу прибора. В то же время благодаря низкой концентрации собственных носителей SiC-приборы благополучно выдерживают температуру до 600°C! К сожалению, из-за несовершенства технологии корпусирования полностью реализовать это преимущество не удастся, и для коммерческих изделий производители ограничивают температуру величиной 175°C.

Классические диоды Шоттки являются униполярными приборами. Теоретически их время восстановления обратного сопротивления стремится к нулю. Однако чтобы повысить напряжение пробоя в Si диодах Шоттки, приходится увеличить толщину эпитаксиального слоя, что, как было показано выше, ведет к увеличению сопротивления. Во избежание этого эффекта следует воспользоваться инжекцией неосновных носителей, из-за которой, однако, возрастает время восстанов-

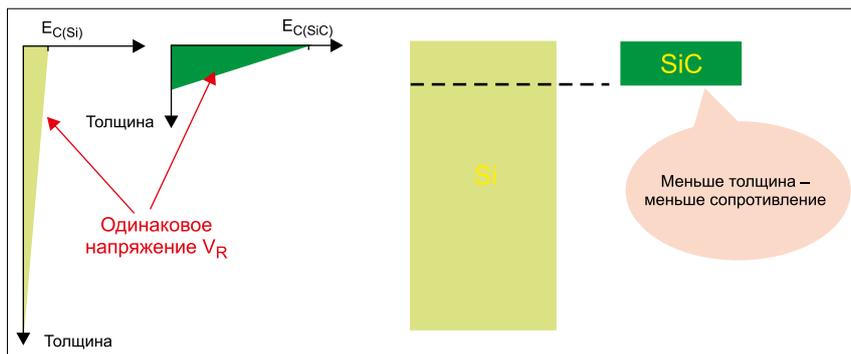


Рис. 1. Сравнение размеров SiC и Si полупроводниковых приборов при одинаковой напряженности электрического поля

ления обратного сопротивления, т. к. требуется дополнительное время для удаления этих носителей и появляется обратный ток. К тому же, этот обратный ток возрастает с увеличением температуры.

С учетом всех описанных обстоятельств производители полупроводников в большинстве случаев ограничили обратное напряжение Si диодов Шоттки величиной 200 В. Для высоковольтных приложений выпускаются SiC диоды Шоттки с обратным напряжением 650; 1200 и 1700 В. На рисунке 2 показаны графики восстановления обратной проводимости SiC-диода, кремниевых быстрых и гипербыстрых диодов.

Далее мы рассмотрим предлагаемую компанией WeEn новую структуру диодов Шоттки MPS, которая упоминалась в начале статьи (см. рис. 3). В первый момент включения диод начинает пропускать ток через *p-n*-переходы (работает в биполярном режиме), и происходит выброс тока (surge current). Затем основные носители попадают в зону дрейфа, что приводит к уменьшению сопротивления, благодаря чему диод выдерживает значительный импульсный ток. Поскольку, однако, увеличение области *p-n*-перехода приводит к уменьшению области Шоттки, сопротивление вновь увеличится при номинальном прямом токе во второй фазе проводимости, когда биполярный режим отключится.

Таким образом, необходим компромисс между возможностью выдерживать значительный импульсный ток и способностью работать в установившемся режиме при нормальной проводимости и номинальном прямом токе I_F . Компании WeEn удалось найти оптимальную схему расположения P+ зон и эксклюзивный способ формирования металлического контакта. В результате удалось обеспечить способность выдерживать значительный выброс тока без ухудшения параметров при проводимости тока I_F .

Другой особенностью SiC диодов Шоттки MPS является уменьшение толщины подложки – ее толщина в MPS-диодах составляет только 1/3 от стандартной толщины. Добиться такого результата удалось благодаря усовершенствованному производственному процессу, что привело к уменьшению сопротивления. Особенно это улучшение заметно для 650-В диодов, у которых небольшое сопротивление эпитаксиального слоя по сравнению с высоковольтными диодами. На рисунке 4 приведены вольт-амперные характеристики 650-В SiC диода Шоттки MPS и 650-В SiC диода Шоттки JBS другой

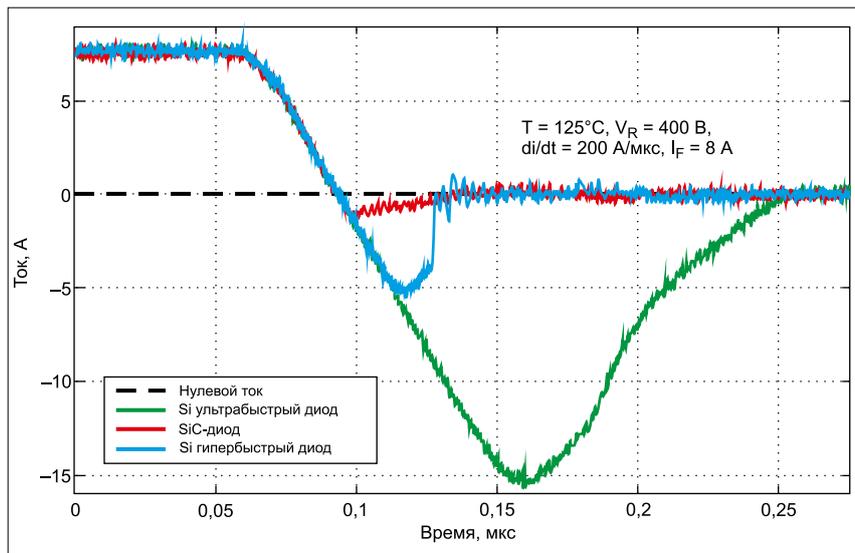


Рис. 2. Графики восстановления обратной проводимости диодов разных типов

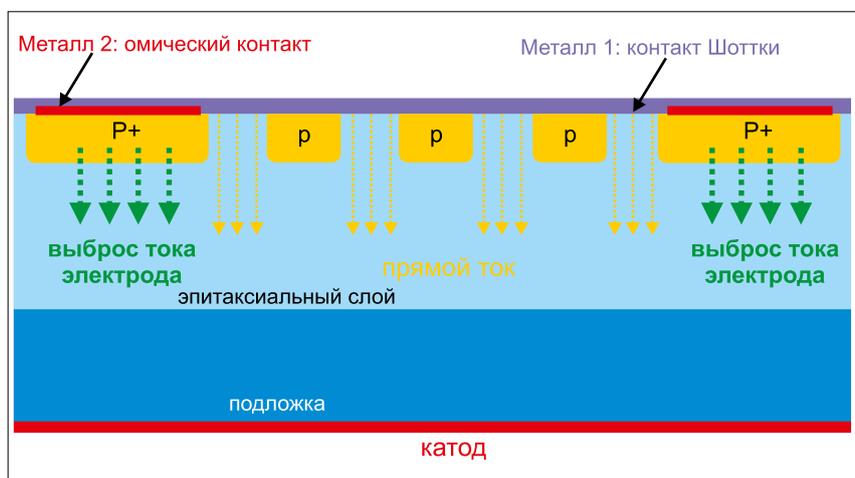


Рис. 3. Структура диодов Шоттки MPS

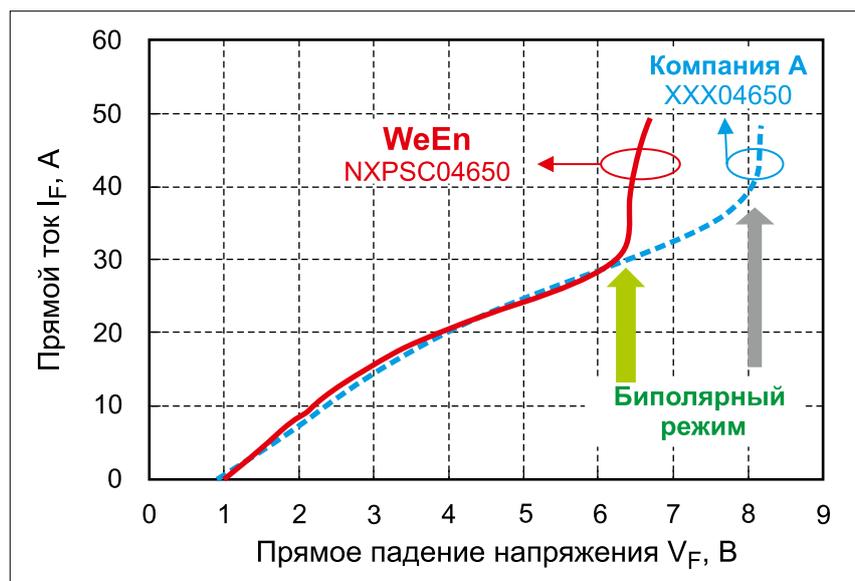


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики 650-В SiC диода Шоттки MPS и 650-В SiC диода Шоттки JBS другой компании

компании. Видно, что выигрыш при больших токах – на стороне диодов MPS: благодаря весьма значительному преимуществу в 2 В существенно уменьшаются потери и нагрев.

Заметим, что SiC диод Шоттки MPS является униполярным прибором несмотря на наличие *p-n*-переходов и зон P+, которые работают только в первой фазе коммутации при

выбросе тока. Таким образом, время коммутации этих диодов гораздо меньше, чем у биполярных Si FRD диодов. Тем не менее, обратный ток у диодов Шоттки все же имеется, но обусловлен он не неосновными носителями, как у биполярных приборов, а перезарядом паразитной переходной емкости. Последняя зависит от конструкции

диода и от эпитаксиального слоя. По этой причине у SiC диодов Шоттки разных производителей могут наблюдаться разные характеристики обратного восстановления.

В [1] приводится таблица, в которой указана величина заряда Q_{RR} диодов Шоттки пяти разных компаний: он находится в диапазоне 15,2–33,8 нКл.

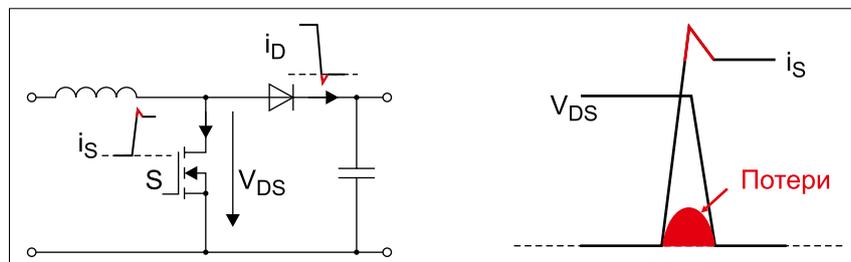


Рис. 5. Использование диодов Шоттки в схеме корректора коэффициента мощности

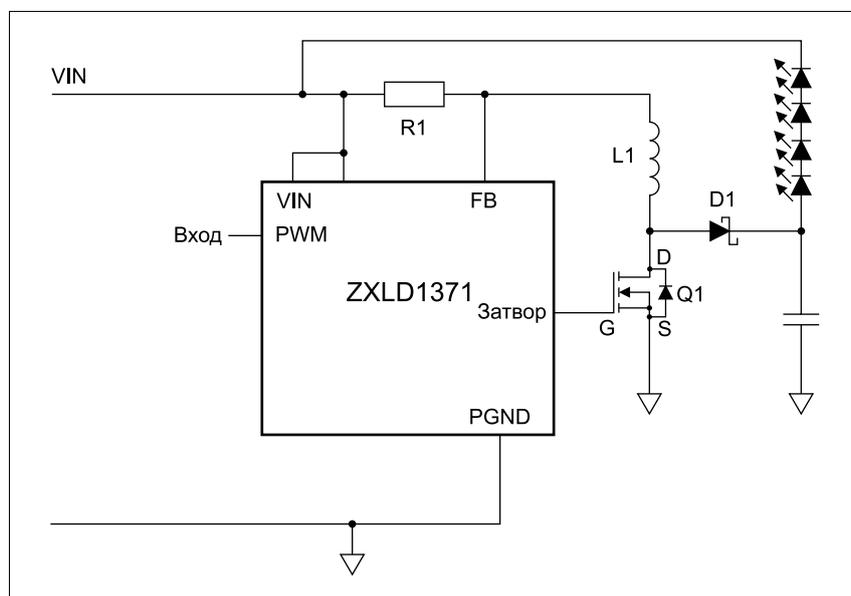


Рис. 6. Повышающий преобразователь для управления светодиодным освещением

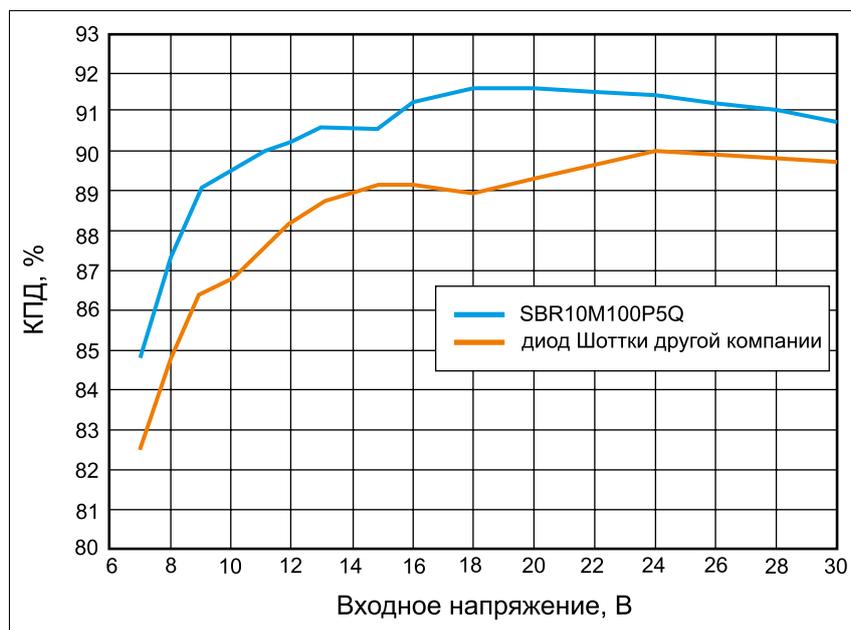


Рис. 7. Изменение КПД преобразователя в зависимости от входного напряжения с диодом SBR10M100P5Q и диодом Шоттки другой компании

У SiC диода Шоттки MPS компании WeEn заряд Q_{RR} составляет 14,3 нКл. Испытания проводились при следующих условиях:

- прямой ток $I_F = 10$ А;
- $di/dt = 500$ А/мкс;
- обратное напряжение: $V_R = 400$ В;
- $T = 25^\circ\text{C}$.

На рисунке 5 показано типовое использование диодов Шоттки в схеме корректора коэффициента мощности (ККМ). Если ККМ работает в режиме непрерывной проводимости, то при запираии диода и открывании ключа ток обратного восстановления вызовет потери мощности в ключе: они выделены красным цветом справа на рисунке 5, где схематично показан процесс включения силового ключа. Следовательно, уменьшение заряда восстановления Q_{RR} позволяет сократить коммутационные потери и увеличить частоту коммутации.

ТЕХНОЛОГИЯ SUPER BARRIER RECTIFIER КОМПАНИИ DIODES INCORPORATED

В проприетарной запатентованной технологии Super Barrier Rectifier (SBR) компании Diodes Incorporated используется производственный процесс металл-оксид-полупроводник (MOS). Канал MOS формирует низкий потенциальный барьер для основных носителей, в результате чего величина прямого смещения перехода та же, что и у диодов Шоттки. Однако ток утечки у SBR меньше, чем у диодов Шоттки из-за перекрывающихся $p-n$ -слоев, причем потенциальный барьер этих слоев не понижается.

Внутренняя структура SBR похожа на MOSFET, в котором закороченные выводы затвора и истока служат анодом диода, а сток MOSFET является катодом. Фактически SBR ведет себя в схемах так же, как обычный диод, поэтому на принципиальных электрических схемах он имеет то же обозначение, что и диод, и может использоваться взамен диодов Шоттки с аналогичными значениями нормируемого тока и напряжения.

Прямое падение напряжения и время восстановления обратного сопротивления примерно такие же, как у диодов Шоттки. Однако у SBR – отличная температурная стабильность, низкие токи утечки и высокая стойкость к лавинным пробоям. В таблице [2] приведены сравнительные характеристики SBR10M100P5Q производства компании Diodes Incorporated и диода Шоттки с нормируемым током 10 А и обратным напряжением 100 В. Хотя диоды Шоттки разных производителей могут различаться, приведенная таблица достаточно

информативно иллюстрирует различие этих двух технологий.

Рассмотрим практический пример использования диода SBR10M100P5Q. На рисунке 6 показан повышающий преобразователь для управления светодиодным освещением. Как известно, в этом преобразователе ток через силовой ключ и диод выше тока нагрузки, в данном случае тока светодиодов, и потому коммутационные потери в данных компонентах желательно минимизировать. Как видно из таблицы, с увеличением температуры ток утечки в диоде Шоттки растет гораздо быстрее, чем в диоде SBR.

На рисунке 7 показано изменение КПД преобразователя (см. рис. 6) в зависимости от входного напряжения для диода SBR10M100P5Q и диода Шоттки другой компании с аналогичными нормируемыми значениями тока и напряжения. Измерения производились при 85°C, и разница в 6%, конечно, весьма заметна. При аналогичных измерениях при 25°C разница была меньше – не более 2%. Зависимость КПД преобразователя с диодом Шоттки и диодом SBR10M100P5Q в зависимости от температуры показана на рисунке 8. ▢

ЛИТЕРАТУРА

1. Alex Cui. *Design and Optimization of Silicon Carbide Schottky Diode*//www.bodospower.com.

2. *Improving Power Conversion Efficiency with Super Barrier Rectifiers*//www.diodes.com.

Таблица. Сравнительные характеристики диодов SBR10M100P5Q от компании Diodes Incorporated и диода Шоттки с нормируемым током 10 А и обратным напряжением 100 В

Параметр	SBR10M100P5Q	Диод Шоттки 10 А/100 В
Прямое падение напряжения при 1 А и 85°C, В	0,5	0,5
Прямое падение напряжения при 10 А и 85°C, В	0,7	0,72
Ток утечки при 85°C, мкА	1,7	18
Ток утечки при 125°C, мкА	15	300
Энергия лавинного пробоя, мДж	400	20
Время восстановления обратного сопротивления при $I_f = 3$ А, $di/dt = 50$ А/мкс, $V_R = 50$ В, 85°C	28,3	33,2
Заряд Q_{RR} при $I_f = 3$ А, $di/dt = 50$ А/мкс, $V_R = 50$ В, 85°C, нКл	9,4	14,1

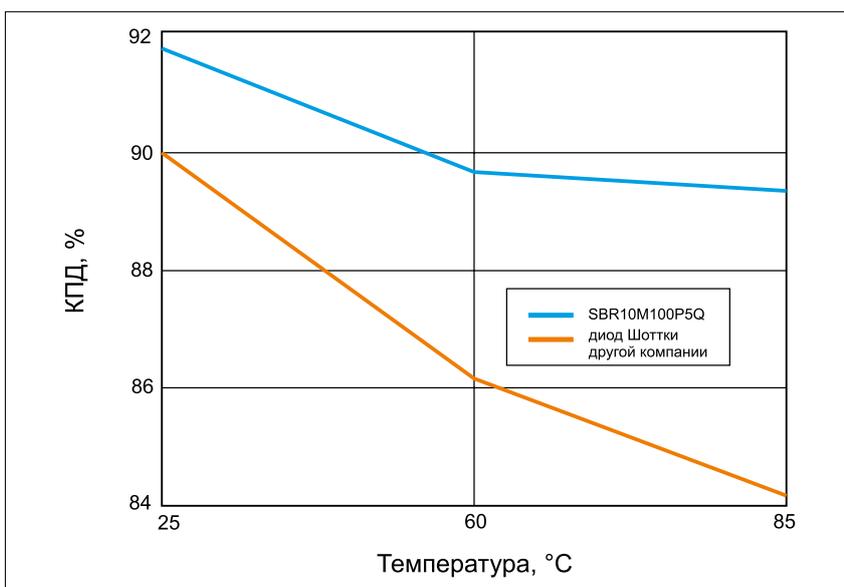


Рис. 8. Температурная зависимость КПД преобразователя с диодом SBR10M100P5Q и диодом Шоттки другой компании