# Динамические характеристики
## SiC-диодов Шоттки

**В статье описаны основные особенности карбидокремниевых диодов с барьером Шоттки (SiC SBD) и их отличия от так называемых тельных (технологических) *p–n*–диодов MOSFET.**

**Дэниел Приндл (Daniel Prindle)**

**Перевод и комментарии: Андрей Колпаков**

### Введение. Особенности SiC–технологии

Различия Si и SiC полупроводниковых приборов прежде всего обусловлены свойствами базовых полупроводниковых материалов. Кремниевые чипы изготавливаются из чистых пластин Si, в то время как пластины SiC содержат как кремний, так и углерод. Это дает карбиду кремния широкий спектр преимуществ по сравнению с чистым кремнием, главными из которых являются более высокая скорость переключения и эффективное рассеивание тепла (рис. 1).

#### *Легирование полупроводников*

Кремний может быть «положительно» или «отрицательно» легирован путем имплантации различных примесей в кристаллическую структуру. Например, у бора на один электрон меньше, чем у кремния. Когда он занимает место атома кремния (рис. 2, слева/посередине), недостающий электрон создает дырку (отсутствие электрона), которая служит носителем положительного заряда. Таким образом, кремний, легированный бором, считается «положительно» легированным (*p*), при этом относительное количество примесей часто обозначается знаками «+» (сильно) или «–» (слабо).

И наоборот, у фосфора на один электрон больше, чем у кремния, соответственно, при использовании такой примеси (рис. 2, справа) дополнительный электрон становится носителем отрицательного заряда. Поэтому говорят, что кремний в таком случае легирован «отрицательно» (*n*). Используются и другие «положительные» и «отрицательные» легирующие примеси.

### Сравнение *p–n*–перехода и барьера Шоттки

*P-n*-диод с одиночным *p-n*-переходом (рис. 3, слева) образуется в зоне контакта положительно (*p*) и отрицательно (*n*) легированного кремния. При прямом смещении свободные электроны в *n*-легированной области и дырки в *p*-легированной области перемещаются через кристалл, формируя электронно-

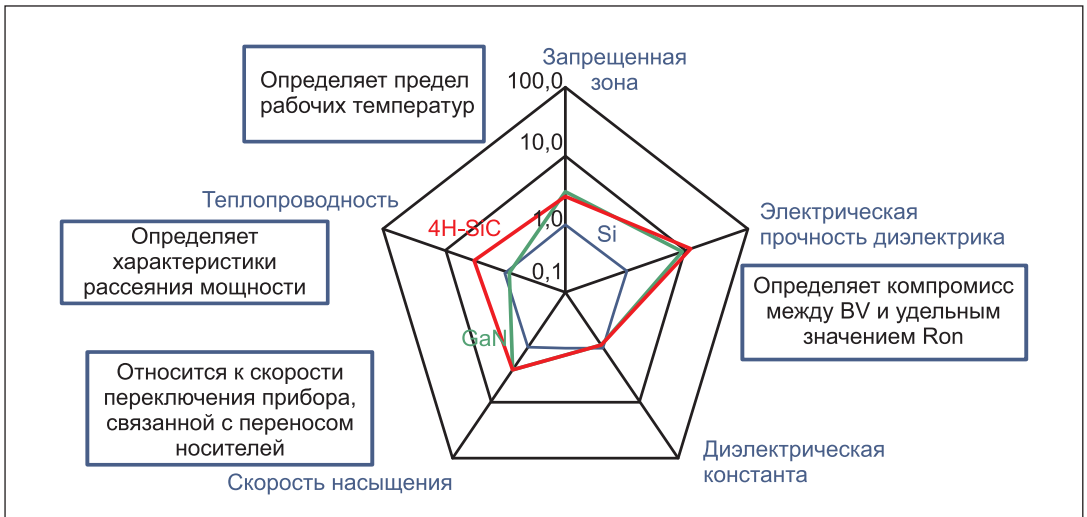


**Рис. 1.** Влияние физических параметров полупроводниковых материалов [2]

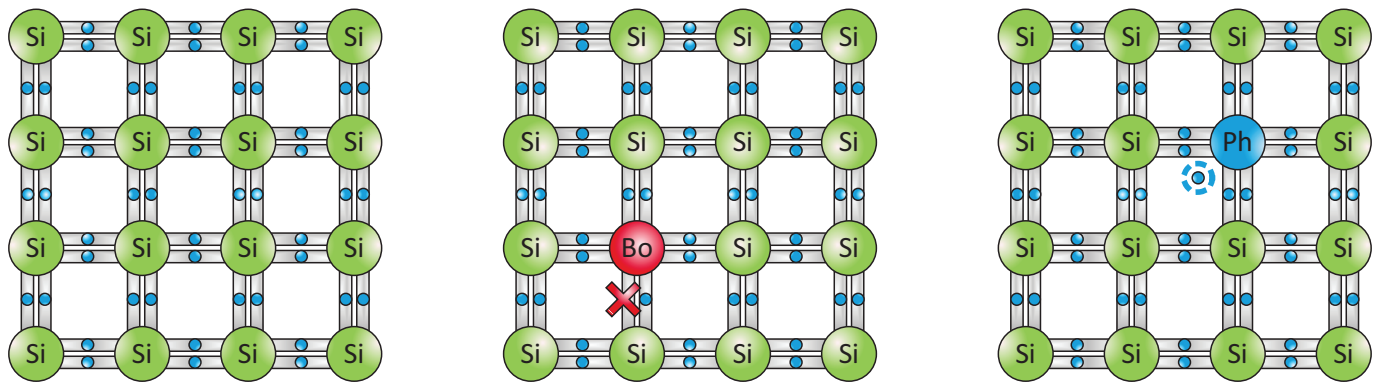


**Рис. 2.** Слева: чистый кремний; в центре: легирование бором; справа: легирование фосфором

дырочную плазму. Поскольку электрическая проводимость создается взаимным движением электронов и дырок, *p-n*-диоды называются биполярными приборами.

Барьер Шоттки формируется при непосредственном соединении слоя металла с *n*-легированным полупроводником. Такой переход ведет себя как диод, и получившийся элемент называется диодом с барьером Шоттки (SBD). Он не имеет *p*-легирующей примеси, соответственно, в процессе проводимости не образуются дырки. Их отсутствие означает, что для переноса тока в SBD используются только электроны (рис. 3, справа), поэтому такие приборы называются униполярными.

Прямое смещение кремниевых *p-n*-диодов обычно составляет около 0,7 В, начальное прямое напряжение Si-диодов Шоттки заметно меньше (≈ 0,3 В). Карбидокремниевые приборы имеют более широкую запрещенную зону (рис. 1), представляющую собой энергию, необходимую для перемещения электрона из валентной зоны в область проводимости, где он может быть использован для переноса тока. Для прямого смещения перехода здесь требуется больше энергии, следовательно, SiC *p-n*-переходы имеют гораздо более высокое падение напряжения, чем Si. По этой причине в диодах, изготовленных из карбида кремния (и других материалов с широкой запрещенной зоной), обычно предусмотрен барьер Шоттки.

Другая причина, по которой SBD-структура предпочтительнее при производстве карбидокремниевых приборов, связана с блокирующей способностью. Без обратно смещенного *p-n*-перехода диоды Шоттки имеют гораздо меньшее пробивное напряжение, что исторически ограничивало применение кремниевых SBD в силовой электронике. Однако более высокая напряженность пробивного электрического поля SiC позволяет изготавливать коммерческие диоды Шоттки с напряжением 650 В и выше.

## Антипараллельные диоды MOSFET

Когда на затвор MOSFET-транзистора подается положительное напряжение, *p*-легированная тельная область смещается, канал открывается, в результате ток может проходить от стока к истоку (рис. 4, слева). *P*-легированная область и *n*-легированные дрейфовые зоны MOSFET (Si или SiC) образуют так называемый тельный *p-n*-диод. Он оказывается смещенным в прямом направлении (то есть активным) при обратном смещении MOSFET (рис. 4, в центре).

Тельный диод электрически антипараллелен каналу «сток-исток» MOSFET, поэтому его поведение резко меняется в зависимости от напряжения на затворе. Если транзистор

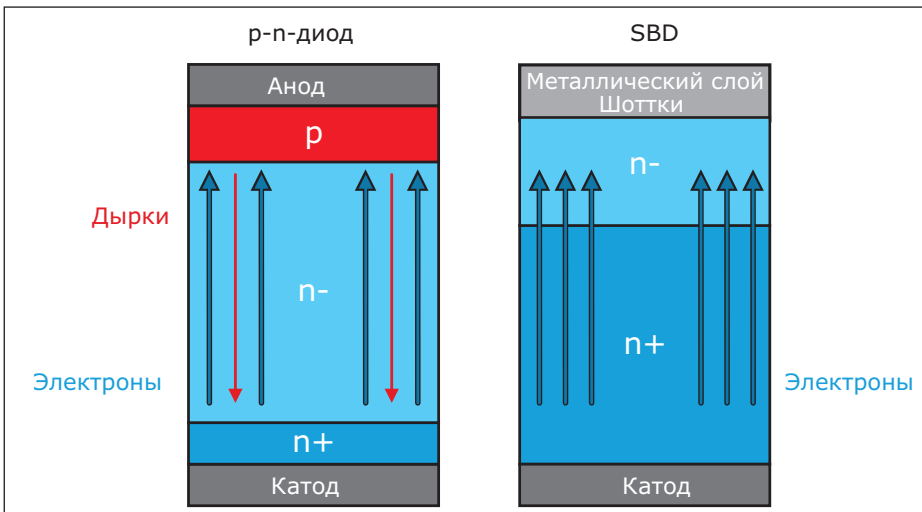


**Рис. 3.** Базовая структура двух типов диодов

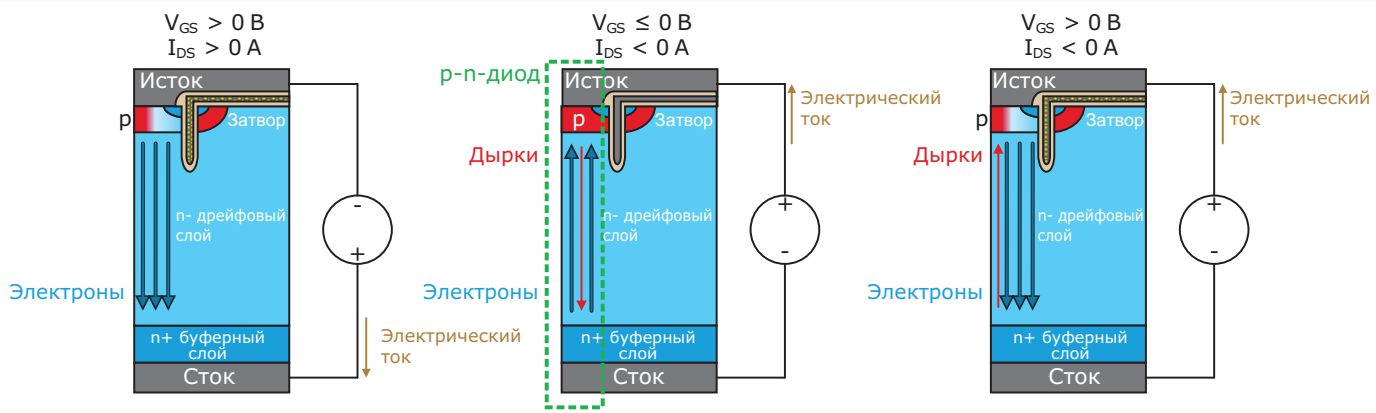


**Рис. 4.** Базовая структура Trench MOSFET

выключен ($V_{GS} \leq 0$ В), он ведет себя как обычный *p-n*-диод с экспоненциально нарастающим прямым напряжением в зависимости от тока (рис. 4, в центре). При положительном напряжении на затворе канал MOSFET частично открывается, формируя путь с меньшим импедансом (рис. 4, справа), в результате чего основной ток обеспечивается электронами. При этом падение напряжения оказывается ниже, чем при проводимости только за счет тельного диода (рис. 5).

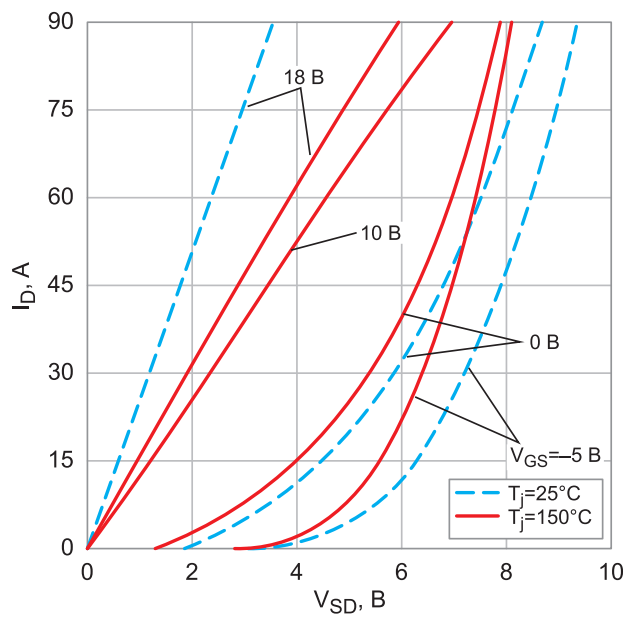


**Рис. 5.** Пример прямой характеристики тельного диода MOSFET [4]

### *Характеристики выключения различных типов диодов*

Характеристики выключения диода очень важны для оценки стабильности работы силового ключа и расчета динамических потерь. Выпрямители с барьером *p-n* и Шоттки демонстрируют различное поведение при выключении (например, в процессе перекоммутации тока с диода на транзистор в полумостовой схеме).

При работе реального физического устройства можно контролировать только общий ток «сток-исток» ($I_{DS}$ или $I_f$), который у разных полупроводниковых структур (например, *p-n*- или SBD-диодов) зависит от вклада различных носителей заряда. Таким образом, общая величина тока складывается из нескольких составляющих. Умножение каждой из них на $V_{DS}$ ($V_F$) и интегрирование результата позволяет вычислить соответствующую долю общего значения $E_{sw}$.

Ток MOSFET, наблюдаемый при отключении диода ($-I_{DS}/I_f$), состоит из трех компонентов (рис. 6):

- ток обратного восстановления, $I_{rr}$;
- емкостный ток перехода, $I_{Cj}$;
- паразитный ток включения (возможно), $I_{pto}$.

Рассмотрим упрощенный подход, основанный на моделировании и нужный для лучшего понимания параллельных динамических процессов. Ток обратного восстановления $I_{rr}$ в *p-n*-тельном диоде MOSFET, генерируемый в процессе рекомбинации электронно-дырочной плазмы, пропорционален прямому току, протекающему перед выключением прибора. По мере удаления плазмы результирующий заряд обратного восстановления($Q_{rr}$) рассеивается в чипе, в результате чего генерируются потери $E_{rr}$.

Еще один компонент тока ($I_{CJ}$) заряжает емкость перехода, в результате происходит рост напряжения на полупроводнике. Энергию, поступающую в емкость, можно приблизительно оценить как:

$$E_{CJ} \approx \frac{\left(C_J \times V^2\right)}{2}.$$

Однако поскольку данный параметр является чисто емкостным, то $E_{CJ}$ генерирует только незначительные потери мощности, обусловленные активным сопротивлением цепи.

Ток $I_{pto}$ протекает через MOSFET, если напряжение на затворе поднимается выше порогового значения. Многие SiC MOSFET-транзисторы имеют низкий порог включения и меньшее значение $-V_{GS_off}$, чем у IGBT (например, –4 В против –15 В для IGBT). Также у карбидокремниевых ключей выше риск паразитного включения из-за более крутых фронтов *dv/dt*.

Емкости «сток-затвор» и «затвор-исток» соединены последовательно (выделены зеленым на рис. 6), что создает емкостный делитель напряжения. Если к цепи «сток-исток» прикладывается положительное значение *dv/dt*, то $C_{GS}$ заряжается и канал может частично открыться. Паразитное включение MOSFET приводит к генерации потерь, называемых $E_{pto}$.

Как правило, это не является проблемой, однако даже короткий период проводимости создает дополнительное рассеяние мощности в приборе. Кроме того, потери $E_{pto}$ не всегда равномерно распределяются по чипу. При многократном прохождении избыточного тока $I_{pto}$ могут возникать зоны локального перегрева.

Примерный характер отключения диода SiC MOSFET (модуль SKM350MB120SCH15 в 62-мм корпусе SEMITRANS 3) показан на рис. 7. Пиковый ток обратного восстановления, наблюдаемый при отключении 350 А ($V_{ds}$ = 600 В), составляет –140 А.

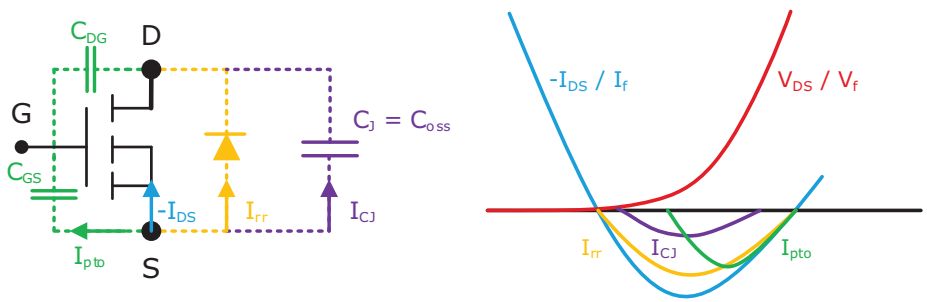


**Рис. 6.** Составляющие обратного тока тельного диода MOSFET

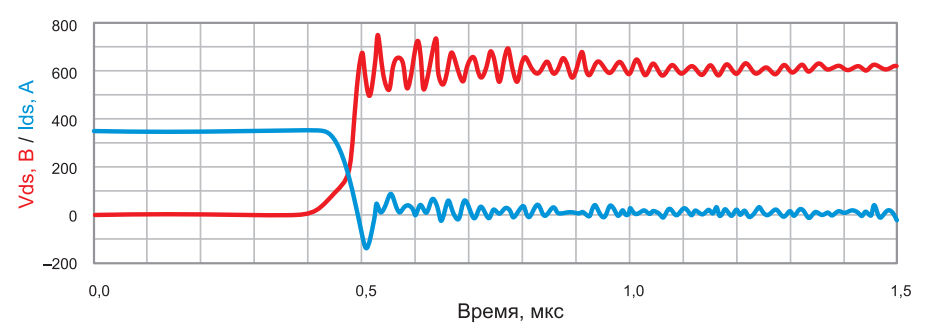


**Рис. 7.** Отключение диода модуля SKM350MB120SCH15

### *SiC MOSFET с антипараллельным диодом Шоттки*

Обратный ток SiC MOSFET с антипараллельным SBD при отключении диода ($-I_{DS}/I_f$) состоит из двух компонентов:

- емкостный ток перехода, $I_{CJ}$;
- паразитный ток включения (возможен), $I_{pto}$.

При нормальной работе ключа основная часть тока проходит через SBD, тельный диод проводит только небольшую его составляющую, в результате в нем генерируется очень мало дырок. По существу, тельный *p-n*-диод SiC MOSFET не создает ток обратного восстановления $I_{rr}$. Кроме того, как объяснялось ранее, в SBD отсутствует обычный механизм рекомбинации потерь $E_{rr}$. Данное фундаментальное различие в поведении объясняет, почему SiC-диоды Шоттки рассеивают гораздо меньшую мощность переключения.

Ток $I_{pto}$ очень похож на $I_{rr}$, при этом он возникает в тех случаях, когда появление $I_{rr}$ не ожидается. Потери, генерируемые за счет $I_{pto}$, нельзя относить к диоду, поскольку нагрев происходит в чипе MOSFET, а не SBD. Термин $E_{rr}$ в спецификациях SiC MOSFET SEMIKRON относится только к составляющим $E_{CJ}$ и $E_{pto}$. Поскольку параметр $E_{CJ}$ является чисто емкостным и не вносит существенного вклада в саморазогрев, его можно вычесть из $E_{rr}$ (MOSFET), чтобы получить более точную оценку фактических потерь. В технических спецификациях SEMIKRON этого не сделано, чтобы физические характеристики прибора были отражены наиболее реально.

Примерный характер выключения диода Шоттки, параллельного SiC MOSFET, показан на рис. 9. Модуль SKM350MB120SCH17 отличается от упомянутого SKM350MB120SCH15 наличием встроенного SBD. Пиковое значение тока обратного восстановления в этом случае намного ниже из-за отсутствия $I_{rr}$ тельного диода, здесь он уменьшается до –70 А (но не до нуля). То, что воспринимается как обратный ток, на самом деле представляет собой сочетание $I_{CJ}$ и $I_{pto}$. Точно определить их соотношение путем прямого измерения не представляется возможным.

При использовании SBD в качестве отдельного диода ток при отключении ($I_f$) имеет только одну составляющую — $I_{CJ}$ (рис. 10). Как было сказано, эта емкостная компонента не создает рассеяния в чипе, а потому динамические потери при коммутации SiC SBD незначительны.

На рис. 11 показан процесс отключения антипараллельного SiC-диода Шоттки в гибридном модуле SKM200GB12T4SiC2 (62-мм корпус SEMITRANS 3). Риск паразитного срабатывания IGBT здесь практически равен нулю, поскольку напряжение отключения $V_{GEoff}$ составляет –15 В, а результирующее значение $dv/dt$ намного ниже, чем у SiC MOSFET.

У карбидокремниевых диодов отсутствует процесс обратного восстановления. Наблюдается только незначительный ток

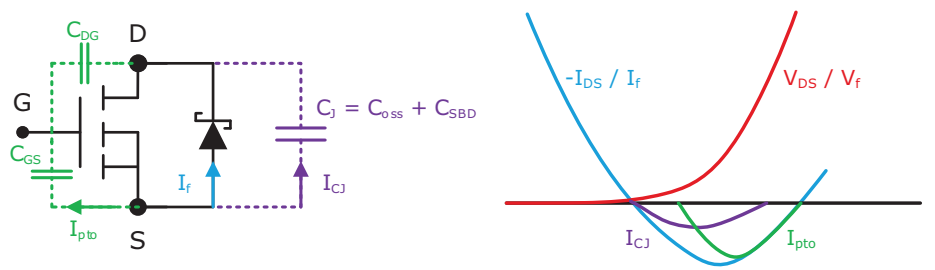


**Рис. 8.** Составляющие обратного тока SiC MOSFET с диодом SBD

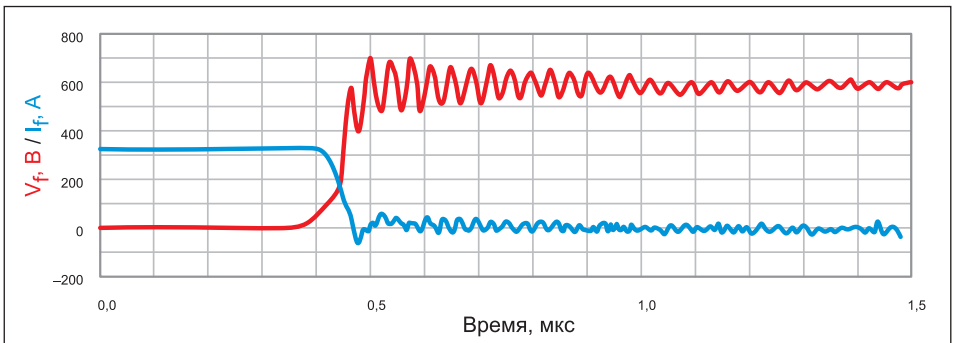


**Рис. 9.** Процесс выключения антипараллельного диода SKM350MB120SCH17

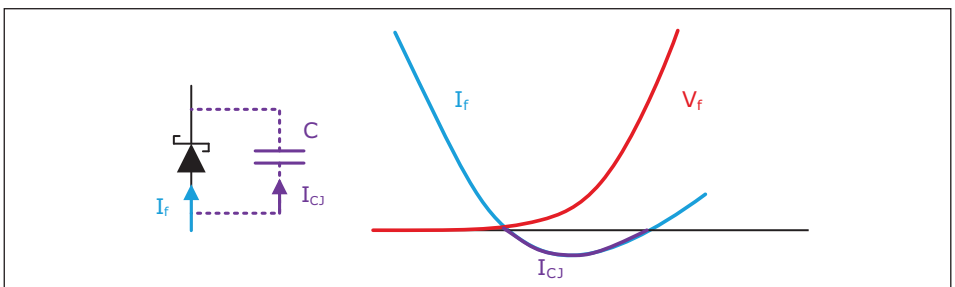


**Рис. 10.** Составляющие обратного тока SBD

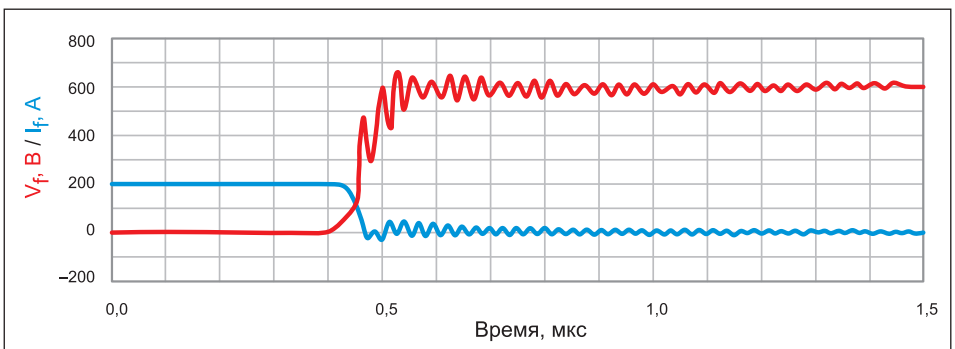


**Рис. 11.** Процесс выключения антипараллельного диода гибридного модуля SKM200GB12T4SiC2

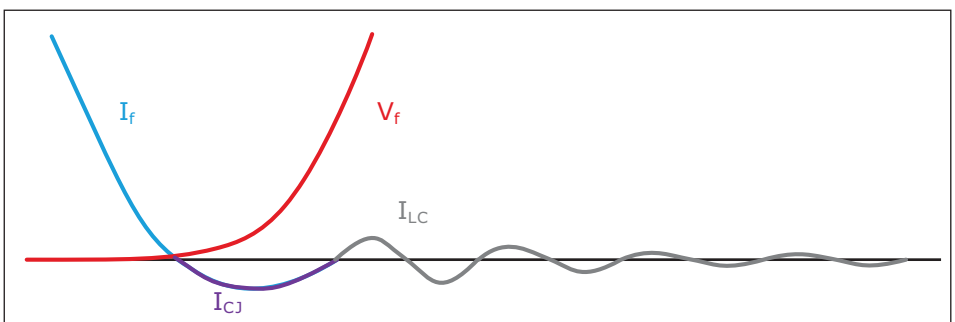


**Рис. 12.** Звон SBD не связан с обратным восстановлением

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $t_{rr}$ | $V_{DD}$ = 600 В<br>$-I_{D1}$ = 175 А<br>$di/dt_{off}$ = 7,5 кА/мкс<br>$V_{GS}$ = –5/+20 В<br>$R_{G1on}$ = 0,5 Ом | $T_j$ = 150°C | 62 | нс |
| $Q_{rr}$ | | $T_j$ = 150°C | 7,2 | мкс |
| $I_{rr}$ | | $T_j$ = 150°C | 232 | А |
| $E_{rr}$ | | $T_j$ = 150°C | 3,3 | мДж |

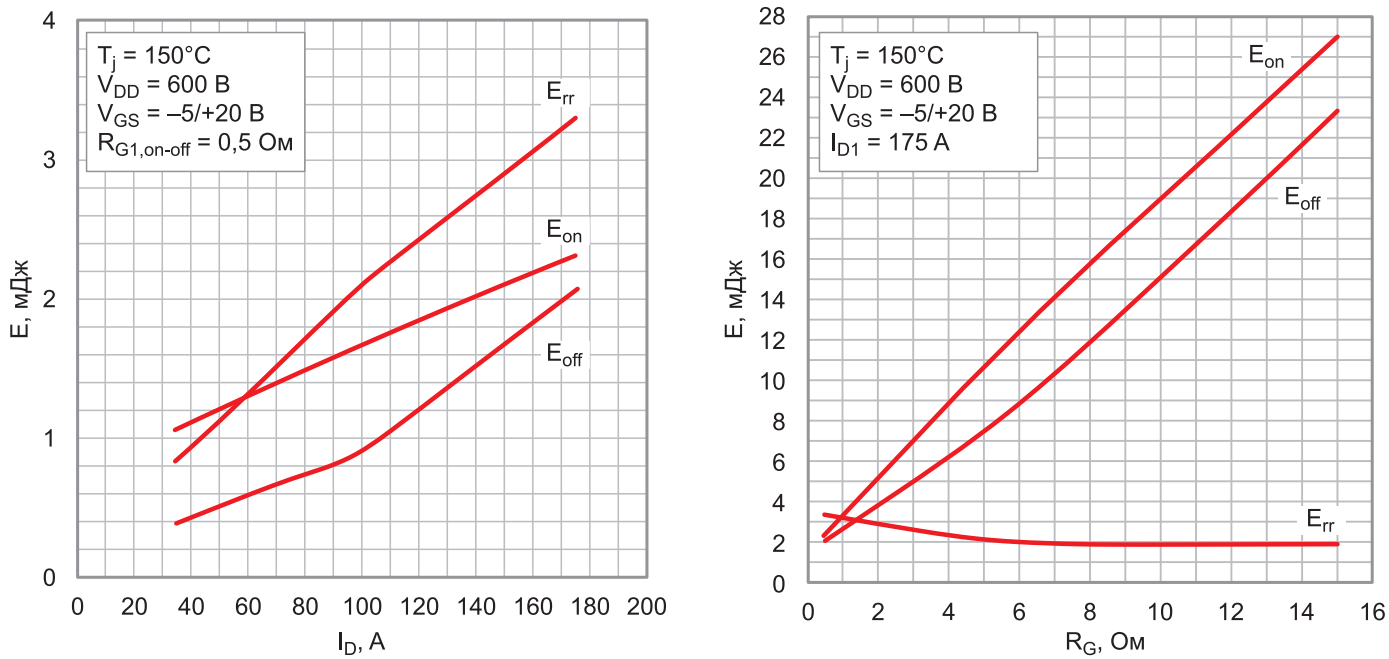


**Рис. 13.** Фрагмент технической спецификации модуля SKM350MB120SCH15 [6]

перезарядки емкостей переходов IGBT и SBD, а также небольшой звон, вызванный наличием паразитных элементов.

В любой из рассмотренных ранее схем может наблюдаться некоторый всплеск тока в процессе или после выключения в зависимости от распределенных коммутационных индуктивностей и емкостей. Причиной паразитных осцилляций в SiC SBD становятся только паразитные элементы, этот процесс не связан с процессами рекомбинации (рис. 12). Такой звон практически не генерирует тепло, наблюдаются лишь незначительные резистивные потери на проводящих цепях.

| | | | |
|---|---|---|---|
| $C_j$ | parallel to $C_{oss}$, f = 1 МГц, $V_R$ = 800 В, $T_j$ = 25°C | 0,42 | нФ |
| $Q_c$ | $V_R$ = 800 В, $di/dt_{off}$ = 500 А/мкс, $T_j$ = 25°C | 0,33 | мкс |

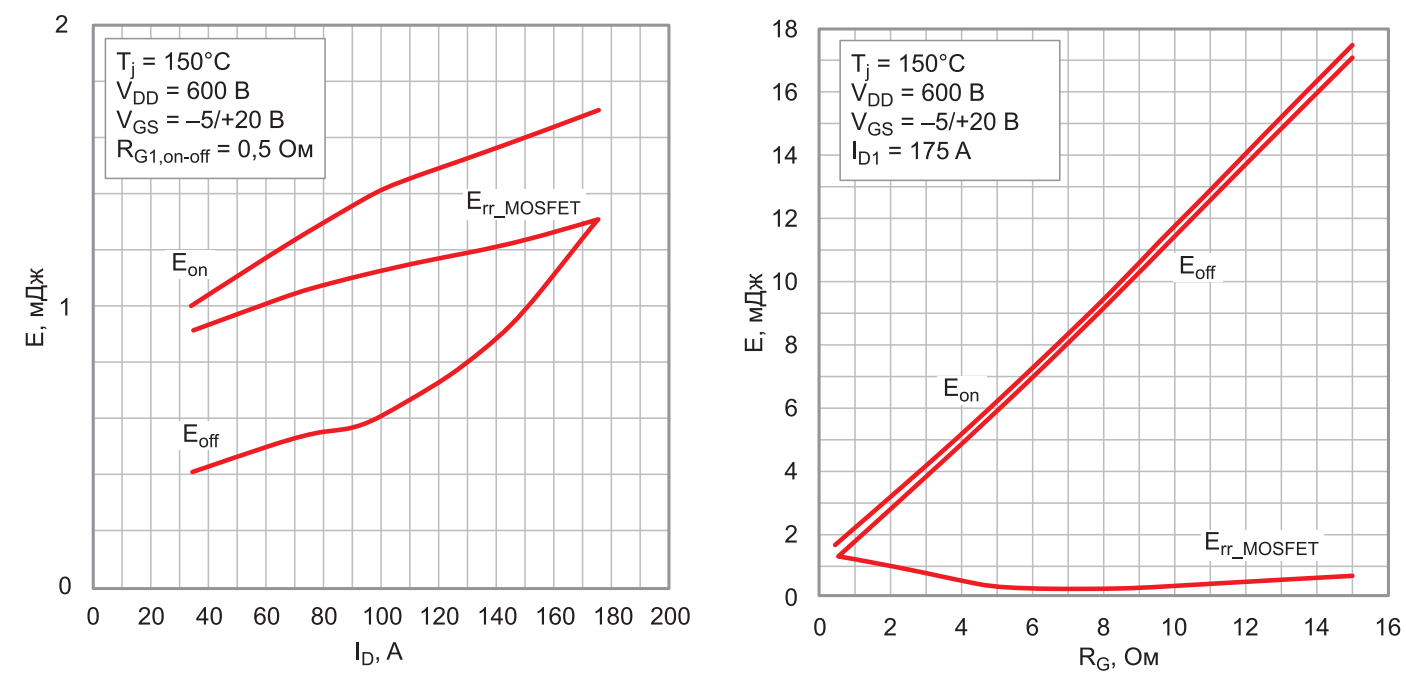


**Рис. 14.** Фрагмент технической спецификации модуля SKM350MB120SCH17 [7]

| | | | |
|---|---|---|---|
| $C_j$ | f = 1 МГц, $V_R$ = 800 В, $T_j$ = 25°C, parallel to $C_{oss}$ | 0,68 | нФ |
| $Q_c$ | $V_R$ = 800 В, $di/dt_{off}$ = 500 А/мкс | 0,53 | мкс |

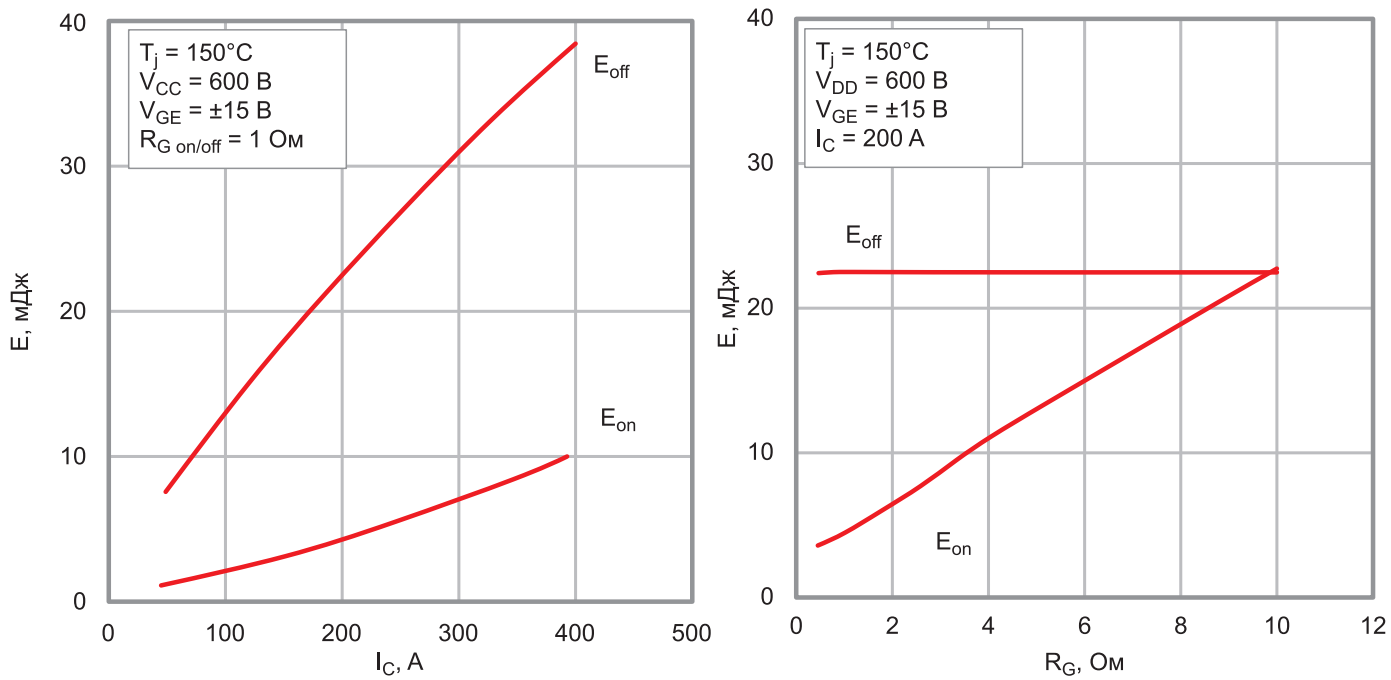


**Рис. 15.** Фрагмент технической спецификации модуля SKM200GB12T4SiC2 [5]

## Технические спецификации SEMIKRON

В этом разделе объясняется, как нормируются потери обратного восстановления для различных типов модулей SEMIKRON.

### *SiC MOSFET без внешнего антипараллельного диода*

При отключении отрицательного тока в MOSFET-модулях с тельным диодом происходит его обратное восстановление, соответственно, для него нормируются значения $I_{rr}$, $Q_{rr}$ и $E_{rr}$ (рис. 13). Эти величины могут учитывать эффекты паразитного включения, но, поскольку все потери генерируются в одном и том же приборе, нет смысла проводить различие между ними, так же как и нет возможности разделить их путем прямого измерения.

Параметры обратного восстановления включают эффекты, связанные с зарядом емкости перехода $C_{oss}$, но этот процесс не создает потерь мощности. Данный компонент потерь для SKM350MB120SCH15 можно приблизительно оценить с помощью приведенной ниже формулы. Следует помнить, что емкости перехода зависят от приложенного напряжения:

$$E_{CJ} \approx \frac{1}{2} C_{oss} V^2 = \frac{1}{2} \times 1{,}1\ \text{нФ} \times$$
$$\times (600\ \text{В})^2 = 0{,}2\ \text{мДж}.$$

Как и в случае с *p-n*-диодами, ток, *di/dt* и температура кристалла влияют на характер обратного восстановления тельного диода MOSFET. Эти параметры отражены в спецификациях, и они должны учитываться при сравнении транзисторов.

### *SiC MOSFET с антипараллельным диодом SiC Шоттки*

Использование диодов SBD в качестве антипараллельных улучшает динамические характеристики силового ключа. Величина $E_{rr}$ (MOSFET) учитывается в динамических кривых, чтобы подчеркнуть потери $E_{pto}$ и отсутствие заметного рассеяния при коммутации SBD. В процессе переключения происходит заряд емкости $C_{oss}$ MOSFET и емкости перехода диода $C_J$, результирующее значение $E_{CJ}$ определяется следующим образом:

$$E_{CJ} \approx \frac{1}{2}(C_{oss} + C_J)V^2 = \frac{1}{2} \times$$
$$\times (1{,}1 + 0{,}42)\ \text{нФ} \times (600\ \text{В})^2 = 0{,}27\ \text{мДж}.$$

Величины емкости перехода $C_j$ SBD и накопленного заряда $Q_c$, указываемые в технической спецификации, достаточно хорошо описывают его динамическое поведение (рис. 14).

### *IGBT с антипараллельным диодом SiC Шоттки (гибридный модуль)*

В гибридных модулях, содержащих Si IGBT и SiC SBD, для диодного режима определяется величина $Q_c$, но не $Q_{rr}$, $I_{rr}$, $E_{rr}$. Риск паразитного включения ($E_{pto}$) IGBT практически отсутствует при напряжении выключения $V_{Goff}$ = –15 В. Скорость коммутации *dv/dt* у гибридов также намного ниже, чем у SiC MOSFET. У диодов SBD отсутствуют потери восстановления, поэтому величина $E_{rr}$ не нормируется. Значения $C_j$ и $Q_c$ включаются в спецификацию для расчета $E_{CJ}$ (рис. 15).

Для SiC-диодов Шоттки, используемых в качестве быстрых выпрямителей, указываются только параметры $C_j$ и $Q_c$, фрагмент спецификации одиночного диода SKKE60S12 в корпусе SEMIPACK 2 представлен на рис. 16. Как обсуждалось ранее, SBD не имеет заряда обратного восстановления, поэтому никаких других динамических параметров или кривых (например, для расчетов выпрямителя или понижающего/повышающего преобразователя) не требуется.

| | | | |
|---|---|---|---|
| $C_j$ | f = 1 МГц, $V_R$ = 800 В, $T_j$ = 25°C | 0,340 | нФ |
| $Q_c$ | $V_R$ = 800 В, $di/dt_{off}$ = 500 А/мкс, $T_j$ = 25°C | 0,26 | мкс |

**Рис. 16.** Фрагмент технической спецификации SKKE60S12 [8]

## Заключение

Развитие технологии карбида кремния позволяет производить высоковольтные SiC-диоды Шоттки, имеющие ряд важных преимуществ перед традиционными кремниевыми

*p-n*-диодами. Важнейшим из них является отсутствие заряда и тока обратного восстановления, что дает существенные преимущества при работе с высокой частотой коммутации.

В настоящее время широкому применению карбидокремниевых ключей препятствует ограниченная нагрузочная способность кристаллов и высокая цена. Основным путем расширения токового диапазона является увеличение размера чипов, однако это не лучший способ в отношении SiC-структур, поскольку он ведет к резкому росту процента дефектных кристаллов и дальнейшему повышению стоимости готовых изделий. Кремниевые чипы производятся на «условно бездефектных» (не более 10% поврежденных чипов) пластинах диаметром 8 и 12" по удельной цене около 0,1 €/см$^2$. Плотность дефектов и, соответственно, стоимость SiC-пластин диаметром 4" пока что примерно на порядок выше.

Отметим, что при прочих равных условиях кристаллы карбида кремния могут иметь меньшую площадь, то есть более высокую плотность тока, следовательно, на SiC-пластинах можно размещать большее количество чипов. Очевидно, что с увеличением плотности упаковки кристаллов затраты на их изготовление должны снижаться. Последние достижения SiC-технологии привели к заметному уменьшению плотности дефектов, которая, однако, по-прежнему гораздо выше, чем у кремниевых приборов. Наиболее известными «врагами» SiC-структур являются так называемые микротрубки, или микропоры, представляющие собой кристаллографические дефекты структуры. При использовании новейшей технологии Dow Corning плотность микропор поддерживается на уровне менее 1/см$^2$.

Степень выхода годных SiC в основном ограничена поверхностными дефектами, образующимися при химическом осаждении из газовой фазы в ходе эпитаксиального процесса (CVD). На сегодня это наиболее значимая проблема, резко снижающая эффективность работы полупроводниковых устройств. Размеры эпитаксиальных дефектов зависят от толщины пленки, а их плотность (1,5–2/см$^2$) характерна для приборов с блокирующим напряжением до 2 кВ.

## Литература


1. Материалы сайта www.SEMIKRON.com
2. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Manual Power Semiconductors. 2nd edition. ISLE Verlag, 2015.
3. Schmidt C., Röblitz M. A Performance Comparison of SiC Power Modules with Schottky and Body Diodes. PCIM, 2017.
4. Sochor P. et al. Understanding the Turn-off Behaviour of SiC MOSFET Body Diodes in Fast Switching Applications, PCIM Europe digital days, 2021.
5. SKM200GB12T4SiC2 Datasheet, Retrieved 2021-11-09. www.semikron.com/dl/servicesupport/downloads/download/semikron-datasheet-skm200gb12t4sic2-22892220.pdf
6. SKM350MB120SCH15 Datasheet Rev. 1.0, Retrieved 2021-10-07. www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheetskm350mb120sch15-21920190.pdf
7. SKM350MB120SCH17 Datasheet Rev. 1.0, Retrieved 2021-10-07. www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheetskm350mb120sch17-21920420.pdf
8. SKKE60S12 Datasheet Rev. 1.0, Retrieved 2021-10-07. www.semikron.com/dl/servicesupport/downloads/download/semikron-datasheet-skke60s12-07920630.pdf