# SiC-діоди: поведінка в динаміці

**Даніель Прінд л (Daniel Prindle), Мартін Робліц (Martin Röblitz), Штефан Хьозер (Stefan Häuser),** Semikron Danfoss
**Переклад: Володимир Павловський,** к.т.н, с.н.с., Інститут електродинаміки (ІЕД) НАН України
**Редагування Сергій Поліщук,** к.т.н, с.н.с., ТОВ НВП «Техносервісприпвід»
E-mail: sp.tsdrive@gmail.com

**У цій статті описано особливості перемикання карбід-кремнієвих діодів Шотткі (Schottky barrier diodes, SBD) та їх відмінності від *p-n*-діодів у корпусі MOSFET.**

## ВСТУП

### Кремній проти карбіду кремнію

Вироби з кремнію (*silicon, Si*) та карбіду кремнію (*silicon carbide, SiC*) виготовляються з різних базових матеріалів. Кремнієві вироби виготовляються з пластин чистого кремнію, тоді як пластини SiC містять як кремній, так і вуглець. Завдяки відмінностям в цих матеріалах SiC має низку переваг перед з чистим кремнієм, таких як вища швидкість перемикання та краще розсіювання тепла (рис. 1).

### Легування напівпровідників

Кремній можна легувати позитивно або негативно шляхом імплантації різних елементів у його кристалічну структуру. Наприклад, бор має на один електрон менше, ніж кремній. Коли він займає місце атома кремнію (рис. 2, ліворуч/посередині), відсутній електрон з бору створює «дірку» (відсутність електрона), яка вважається носієм позитивного заряду. Легований бором кремній тоді називають позитивно легованим (*p*), а відносна кількість легування часто позначається знаками «+» (сильно) або «–» (слабко).

І навпаки, фосфор має на один електрон більше, ніж кремній. Коли кремній легують фосфором (рис. 2, праворуч), зайвий електрон стає носієм негативного заряду. Кремній, легований фосфором, тоді називають негативно легованим (*n*). Також використовуються інші позитивні та негативні легувальні домішки.

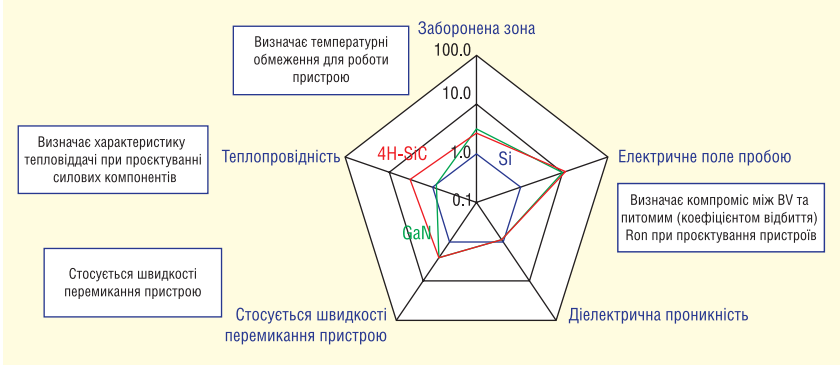


**Рис. 1. Вплив різних фізичних параметрів напівпровідникових матеріалів [2]**

### *p-n*-переходи проти переходів з бар'єром Шотткі

*p-n*-перехід утворюється там, де контактують позитивно (*p*) та негативно (*n*) легований кремній. *p-n*-діод складається з одного *p-n*-переходу (рис. 3, ліворуч). При прямому зміщенні вільні електрони в *n*-легованій області та дірки в *p*-легованій області рухаються через кристал, створюючи електронно-діркову плазму.

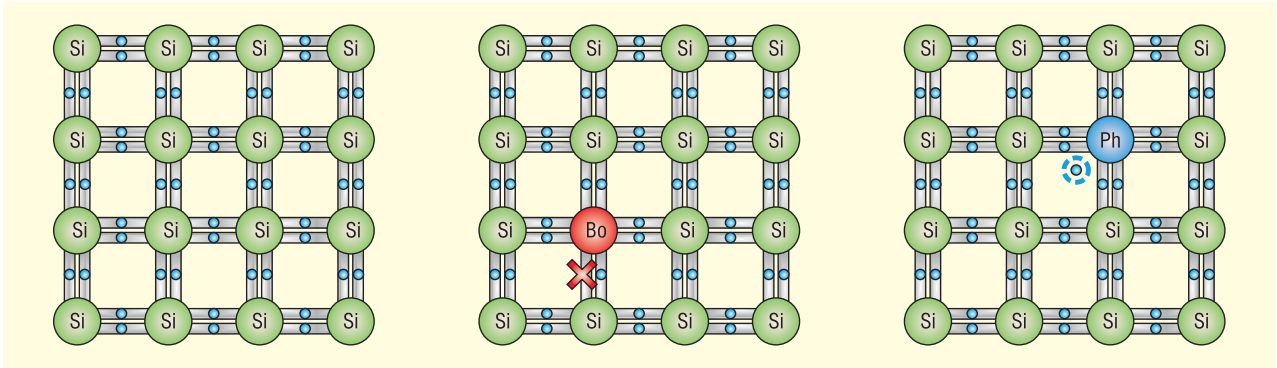


**Рис. 2. Чистий кремній (L), легування бором (M), легування фосфором (R)**

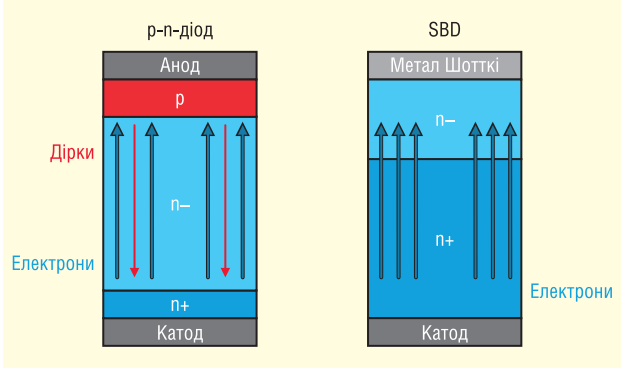


**Рис. 3. Загальна структура двох типів діодів**

Оскільки рух як електронів, так і дірок утворює струм, *p-n*-діоди називаються біполярними пристроями.

Перехід з бар'єром Шотткі утворюється тоді, коли шар металу безпосередньо контактує з *n*-легованим напівпровідником. Цей перехід поводиться як діод, і такий пристрій називається діодом з бар'єром Шотткі (*Schottky barrier diodes, SBD*). Ці пристрої не мають *p*-легувальної домішки, тому під час стану провідності дірки не утворюються. Відсутність дірок означає, що для перенесення струму в SBD (рис. 3, праворуч) використовуються лише електрони, тому SBD називають уніполярними пристроями.

Кремнієві *p-n*-діоди зазвичай зміщуються в прямому напрямку при напрузі приблизно 0.7 В. Без *p-n*-переходу початкове падіння напруги в прямому напрямку діодів з бар'єром Шотткі нижче, в діапазоні 0.3 В для Si.

Пристрої з карбіду кремнію мають ширшу заборонену зону (рис. 1). Це енергія, що необхідна для переміщення електрона з валентної зони в зону провідності, де він може бути використаний для утворення струму. Через ширшу заборонену зону потрібно потратити більше енергії для прямого зміщення переходу, і в результаті карбід-кремнієві *p-n*-діоди мають набагато вище падіння напруги, ніж у Si. З цієї причини діоди, виготовлені з карбіду кремнію (та інших матеріалів із «широкою забороненою зоною»), зазвичай мають бар'єр Шотткі, а не *p-n*-перехід.

Ще одна причина, чому для SBD часто використовують карбід кремнію, пов'язана з можливістю блокування напруги. Без *p-n*-переходу для зворотного зміщення діоди з бар'єром Шотткі мають значно нижчу пробивну напругу. Це історично обмежувало застосування кремнієвих SBD у високовольтній силовій електроніці. Однак вища напруженість пробивного електричного поля SiC дозволила створити комерційно доступні SBD на 650 В і вище.

## Внутрішній MOSFET-діод

Коли на затвор MOSFET подають позитивну напругу, область чипа, легованого *p*-структурою, зміщується, і канал відкривається. Після цього через пристрій може протікати струм у позитивному напрямку, від стоку до витоку (рис. 4, ліворуч).

Області дрейфу чипа, легованого *p*-структурою, та області дрейфу *n*-структури MOSFET (Si чи SiC) утворюють *p-n*-діод. Цей внутрішній діод стає зміщеним у прямому напрямку (активним), коли MOSFET зміщений у зворотному напрямку (рис. 4, посередині).

Внутрішній діод електрично розташований антипаралельно каналу «стік-витік» MOSFET, тому поведінка діода різко змінюється залежно від напруги на затворі. Якщо канал MOSFET вимкнений (VGS ≤ 0 В), внутрішній діод поводиться як типовий *p-n*-діод з прямою напругою, що експоненційно зростає відносно струму (рис. 4, посередині). При позитивній полярності напруги на затворі канал MOSFET частково відкритий, що забезпечує нижчий імпеданс шляху (рис. 4, праворуч) і майже весь струм створюється рухом електронів. Це дає менше падіння напруги, ніж якби струм проводив тільки внутрішній діод (рис. 5).

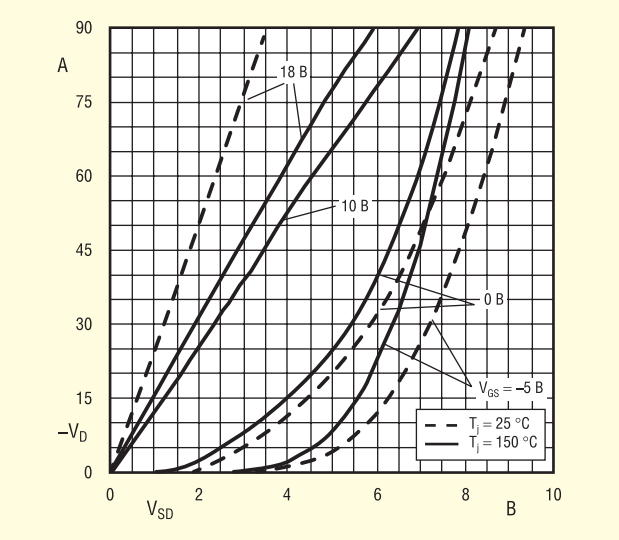


**Рис. 5. Приклад прямої характеристики внутрішнього діода MOSFET [3]**

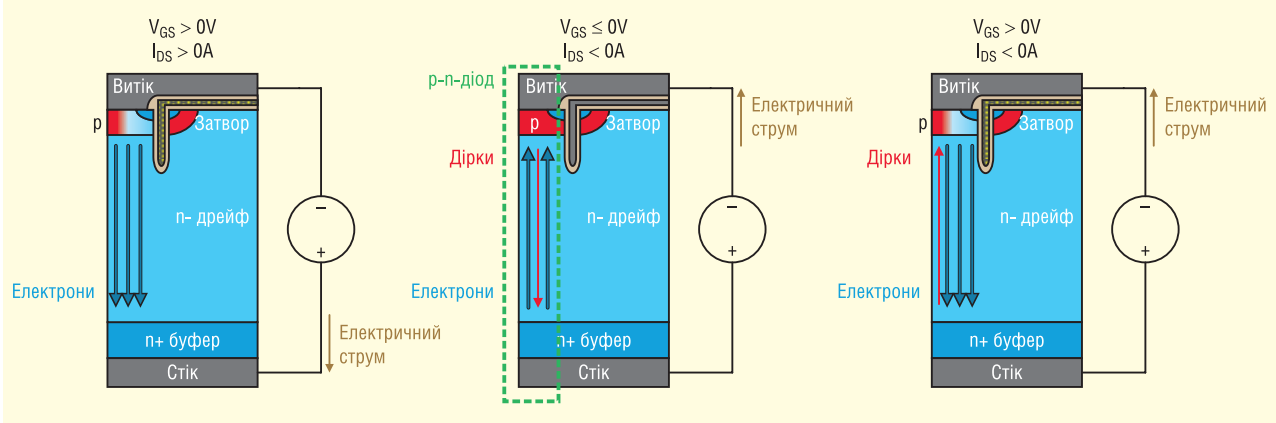


**Рис. 4. Типова структура траншейного MOSFET (з траншейним каналом)**

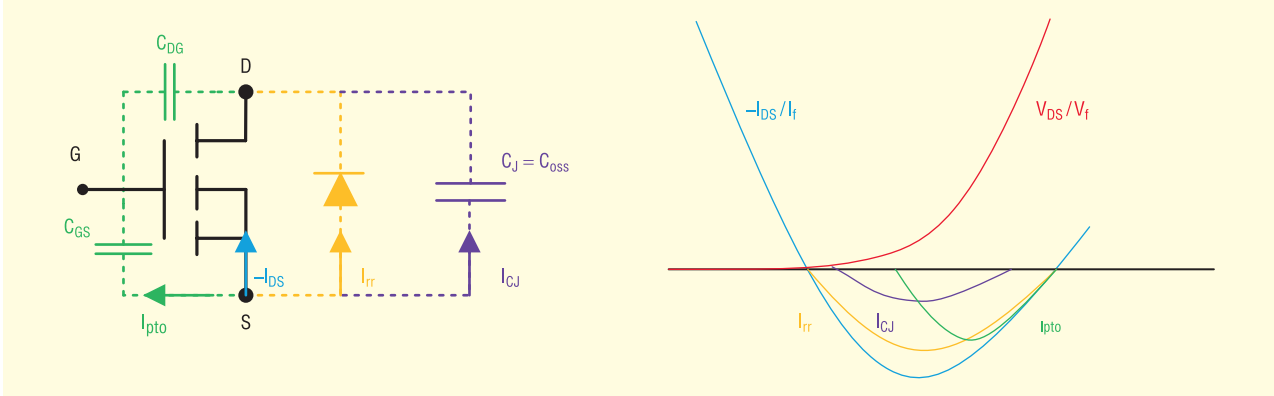


**Рис. 6. Складники зворотного струму у внутрішньому MOSFET-діоді**

## ОСОБЛИВОСТІ ВИМИКАННЯ ДЛЯ РІЗНИХ ТИПІВ ДІОДІВ

Поведінка діода під час вимкнення є основним параметром у силових електронних схемах для оцінки стабільності та втрат при перемиканні. Описані вище *p-n*-діоди та діоди з бар'єром Шотткі демонструють різну поведінку під час вимкнення (наприклад, коли струм комутується від діода до MOSFET у напівмостовій схемі).

Під час проведення вимірювань на реальному пристрої можна виміряти лише загальний струм «стік-витік» ($I_{DS}$ або $I_F$). Залежно від структури напівпровідника (наприклад, *pn*, SBD) різні носії заряду вносять свій внесок у загальний струм.

Загальний струм складається з кількох струмів усередині пристрою, залежно від його типу. Коли кожен складник струму помножити на $V_{DS}$ ($V_F$) та проінтегрувати, то в результаті одержимо часткову енергію перемикання; вона вносить свій внесок у загальну енергію перемикання, яку також можна виміряти.

### Внутрішній MOSFET-діод

Для будь-якого MOSFET струм через пристрій, виміряний під час вимкнення діода ($-I_{DS}/I_f$), складається максимум із трьох складників:

- струм зворотного відновлення, $I_{rr}$;
- струм ємнісного переходу, $I_{CJ}$;
- можливо, паразитний струм увімкнення, $I_{pto}$.

Наведений нижче опис є спрощеним модельним підходом, що використовується для кращого розуміння паралельних динамічних процесів.

Струм $I_{rr}$ у *p-n*-діодах (тобто у внутрішніх MOSFET-діодах) — це струм зворотного відновлення, що генерується рекомбінацією електронно-діркової плазми, який пропорційний струму, що протікає до моменту вимкнення. Коли плазма видаляється з пристрою, результуючий заряд зворотного відновлення ($Q_{rr}$) розсіюється в чипі. Це запускає механізм втрат, і він генерує тепло всередині пристрою; енергію, що нагріває чип, називають $E_{rr}$.

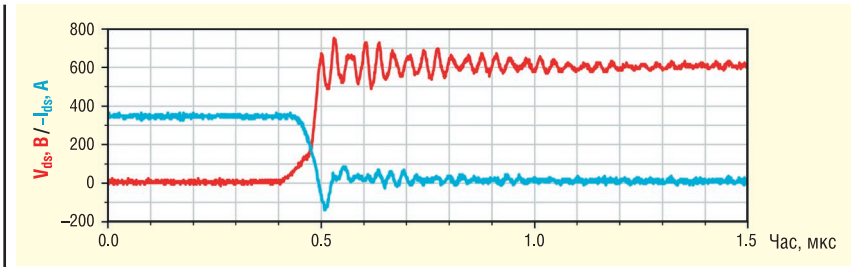


**Рис. 7. Зразок вимкнення діода SKM350MB120SCH15**

Струм $I_{CJ}$, що є ще одним із складників загального струму, надходить у ємність переходу під час її заряджання, і напруга на пристрої збільшується. Результуючу енергію, яка надходить у ємність, можна приблизно оцінити так: $E_{CJ} \approx {}^1/_2 \cdot C_j \cdot V^2$. Однак, оскільки це чисто ємнісний процес, енергія $E_{CJ}$ не генерує реальних втрат потужності, окрім незначних резистивних втрат у загальній схемі. Виміряна потужність накопичується в електричному полі всередині *p-n*-переходу.

Струм $I_{pto}$ — це струм, який протікає через MOSFET, якщо напруга на затворі підіймається вище порогової. Багато SiC MOSFET мають нижчу порогову напругу та високу напругу $V_{GSoff}$ (тобто ближче до нуля, –4 В, а не –15 В, як в IGBT). Можливе паразитне вмикання модуля через вище значення *dv/dt*, спричинене вищими швидкостями перемикання SiC-пристроїв.

Ємності «стік-затвор» і «затвор-витік» з'єднані послідовно (рис. 6, зелена схема). Це створює ємнісний подільник напруги. Якщо від стоку до витоку швидкість зміни напруги *dv/dt* має позитивний знак, то ємність $C_{GS}$ може зарядитися, і канал може трохи відкритися, що спричинить ненавмисне ввімкнення MOSFET. Це також є механізмом втрат, і він генерує тепло всередині пристрою; енергію, що нагріває чип, називають $E_{pto}$.

Хоча цей короткий період провідності не обов'язково може спричинити пошкодження схеми, він генерує додаткові втрати всередині пристрою. Крім того, такі втрати не завжди рівномірно розподілені по всьому чипу. У чипі можуть виникати локальні гарячі точки, якщо надмірному струмові $I_{pto}$ дозволяють неодноразово протікати через пристрій.

Приклад поведінки реального діода на основі SiC MOSFET під час вимикання показано на рисунку 7. Модуль має назву SKM350MB120SCH15 у добре відомому 62-міліметровому корпусі SEMITRANS 3. Вимірювання проводилися при напрузі 600 В та струмі 350 А. Піковий струм зворотного відновлення становить мінус 140 А.

### Модуль SiC MOSFET з антипаралельним діодом Шотткі

Для модулів SiC MOSFET з антипаралельним діодом з бар'єром Шотткі виміряний струм через пристрій під час вимкнення діода ($-I_{DS}/I_f$) складається із двох складників (рис. 8):

- ємнісний струм переходу, $I_{CJ}$;
- можливий паразитний струм увімкнення, $I_{pto}$.

Під час нормальної роботи через SBD проходить основна частина стру-

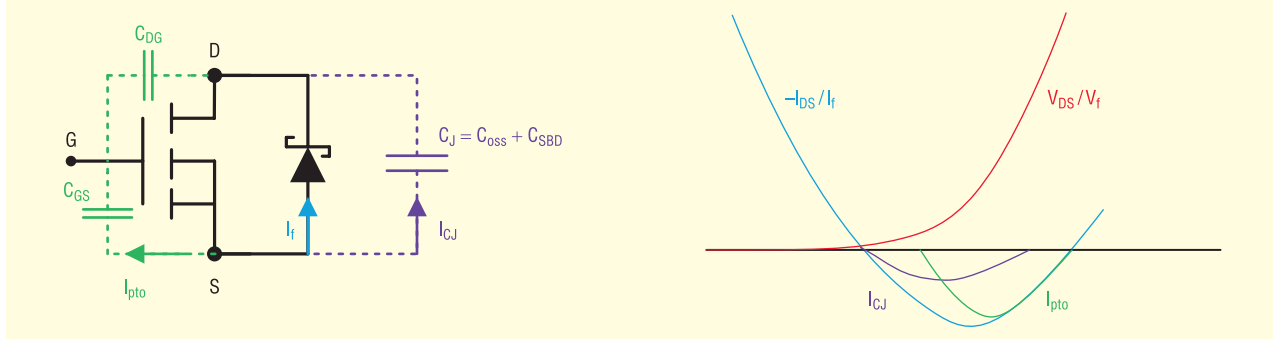


**Рис. 8. Складники зворотного струму в SiC модулі MOSFET та діоді з бар'єром Шотткі**

му, а через внутрішній діод — лише мінімальна його кількість. В результаті всередині діода генерується дуже мало дірок. По суті, зворотний струм відновлення не буде генеруватися pn діодом SiC MOSFET. Як пояснювалося раніше, цей механізм рекомбінації з втратами ($E_{rr}$) відсутній у SBD. Така фундаментальна різниця в поведінці діодів пояснює, чому SiC діоди з бар'єром Шотткі генерують набагато менші втрати на перемикання.

Струм $I_{pto}$ може бути дуже схожим на струм $I_{rr}$ і може виникати у випадках, коли струм $I_{rr}$ не очікується, наприклад, якщо SBD підключено паралельно до модуля MOSFET. Якщо протікає струм $I_{pto}$, важливо уникати приписування втрат діода SBD, оскільки нагрівання відбувається всередині MOSFET, а не в SBD.

Новий термін у технічних характеристиках Semikron Danfoss — енергія $E_{rr(MOSFET)}$, описує енергію лише від $E_{CJ}$ та $E_{pto}$. Оскільки енергія $E_{CJ}$ є чисто ємнісною і не робить суттєвого внеску в самонагрівання пристрою, її можна відняти від енергії $E_{rr(MOSFET)}$, щоб отримати точнішу оцінку фактичних втрат пристрою. Semikron Danfoss попередньо не віднімає енергію $E_{CJ}$ від енергії $E_{rr(MOSFET)}$, щоб технічні характеристики пристроїв краще відображали реальні виміряні значення.

Приклад поведінки під час вимикання реального діода з бар'єром Шотткі, що з'єднаний паралельно з SiC MOSFET, показано на рисунку 9. Модуль — це SKM350MB120SCH17, що є ідентичним модулю SKM350MB120SCH15, але з додаванням окремого SBD. Залишковий пік зворотного струму значно нижчий через відсутність струму $I_{rr}$ у внутрішньому діоді. В результаті струм зворотного відновлення зменшився до –70 А, але не до нуля. Те, що здається струмом зворотного відновлення, насправді є лише комбінацією струмів $I_{CJ}$ та $I_{pto}$. Точно визначити таке співвідношення шляхом прямого вимірювання неможливо.

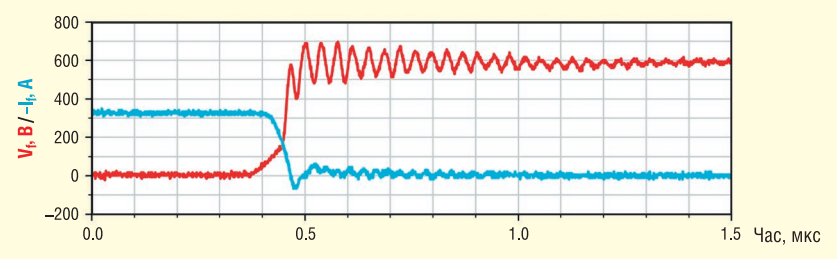


**Рис. 9. Зразок вимкнення діода SKM350MB120SCH17**

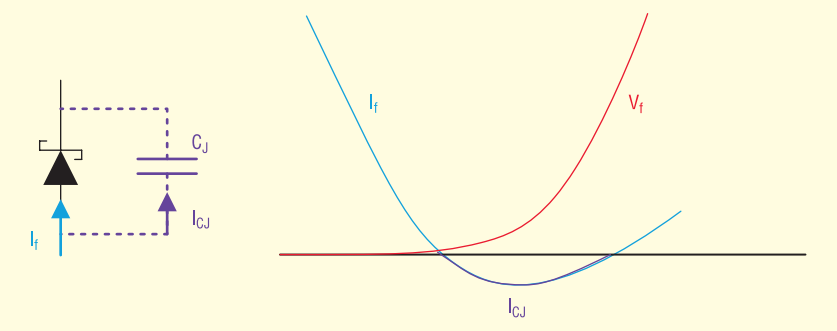


**Рис. 10. Компоненти зворотного струму в самому діоді з бар'єром Шотткі**

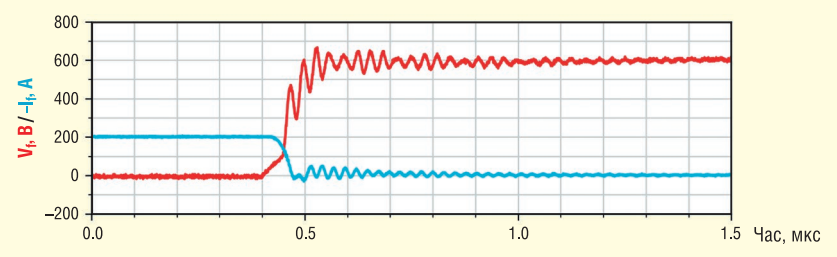


**Рис. 11. Зразок вимкнення діода SKM200GB12T4SiC2**

## Тільки діод із бар'єром Шотткі

Якщо використовується лише діод із бар'єром Шотткі (рис. 10), виміряний струм під час вимкнення діода ($I_f$) складається лише з одного струму:

- струм ємнісного переходу, $I_{CJ}$.

Як описано вище, цей ємнісний струм не створює втрат усередині кристала; в результаті, втрати на перемикання тільки SiC SBD є незначними.

Приклад поведінки реального діода з бар'єром Шотткі під час вимикання показано на рисунку 11. Тип модуля — SKM200GB12T4SiC2 у корпусі SEMITRANS3. Це гібридне рішення на основі SiC, де швидкий IGBT поєднаний з антипаралельним SBD. Ризик паразитного вмикання IGBT практично дорівнює нулю, оскільки $V_{GEoff}$ становить –15 В, а результуюче значення $du/dt$ набагато нижче порівняно з SiC MOSFET. Під час вимикання діода використовується лише діод Шотткі. Зворотне відновлення практично відсутнє. Певний струм, спричинений перезаряджанням ємностей переходу IGBT та SBD, все ж протікає; так само під час вимикання можна спостерігати й певні

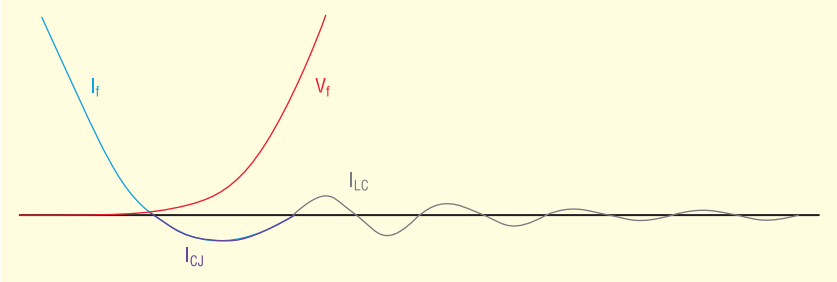


**Рис. 12. Паразитні коливання, що згасають, а не зворотне відновлення**

коливальні процеси, зумовлені паразитними параметрами.

### Струм $I_{LC}$: паразитні коливання

Будь-яка з раніше обговорюваних схем може мати певний сплеск струму під час або після її вимкнення залежно від конструктивних індуктивності та ємностей системи. У SiC SBD паразитне коливання є просто продуктом паразитних явищ і не викликане рекомбінацією всередині чипа (рис. 12). Ці коливання не генерують тепло всередині діода, окрім резистивних втрат у провідниках електричного кола.

## ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛІВ SEMIKRON DANFOSS

У цьому розділі пояснимо, як описані втрати на зворотне відновлення в модулях Semikron Danfoss для різних типів пристроїв.

### Тільки SiC MOSFET

Оскільки MOSFET-модулі містять внутрішній діод, зворотне відновлення відбуватиметься при вимкненні струму негативної полярності. Як результат, для внутрішнього діода вказано параметри $I_{rr}$, $Q_{rr}$ та $E_{rr}$ (рис. 13).

Значення цих параметрів також можуть містити ефекти паразитного ввімкнення. Але оскільки обидві ці втрати генеруються в одному ключі, тому немає потреби їх розрізняти, оскільки вони відбуваються в одному місці та в один і той же час.

Ці втрати також включають ефект, спричинений заряджанням ємності переходу Coss, яка не викликає втрат потужності в пристрої. Наприклад, значення для SKM350MB120SCH15 можна приблизно оцінити за формулою:

$$E_{CJ} \approx {}^1/_2 \cdot \mathrm{Coss} \cdot V^2 =$$

$$= {}^1/_2 \cdot 1.1\ \text{нФ} \cdot (600\,V)^2 = 0.2\ \text{мДж}.$$

Зверніть увагу, що значення ємності переходу залежать від напруги на переході.

Як і у випадку з *p-n*-діодами, такі параметри, як струм, швидкість його зміни *di/dt* та температура переходу впливають на поведінку зворотного відновлення внутрішнього діода MOSFET. Тому ці значення включені до технічних характеристик та повинні враховуватися під час порівняння з іншими технічними характеристиками.

### SiC MOSFET і діод із бар'єром Шотткі

SBD часто встановлюють антипаралельно з MOSFET, щоб додатково покращити зворотне відновлення внутрішнього діода. Енергія $E_{rr(MOSFET)}$ врахована в динамічних кривих, щоб побачити різницю між втратами $E_{pto}$ в MOSFET та відсутністю суттєвих втрат на перемикання в SBD.

Окрім заряджання ємності $C_{oss}$ MOSFET, також необхідно заряджати ємність переходу діода:

$$E_{CJ} \approx {}^1/_2 \cdot (C_{oss} + C_J) \cdot V^2 = {}^1/_2 \cdot (1.1 +$$

$$+ 0.42)\ \text{нФ} \cdot (600\,V)^2 = 0.27\ \text{мДж}.$$

Ємність переходу SBD та накопичений заряд, зазначені в технічних характеристиках модуля, достатньо добре описують його динамічну поведінку (рис. 14).

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $t_{rr}$ | $V_{DD}$ = 600 В | $T_j$ = 150 °C | 62 | нФ |
| $Q_{rr}$ | $-I_D$ = 175 А | $T_j$ = 150 °C | 7.2 | мкС |
| $I_{rr}$ | $di/dt_{off}$ = 7.5 кА/мкс | $T_j$ = 150 °C | 232 | А |
| $E_{rr}$ | $V_{GS}$ = –5 В<br>$R_{Gon}$ = 0.5 Ом | $T_j$ = 150 °C | 3.3 | мДж |

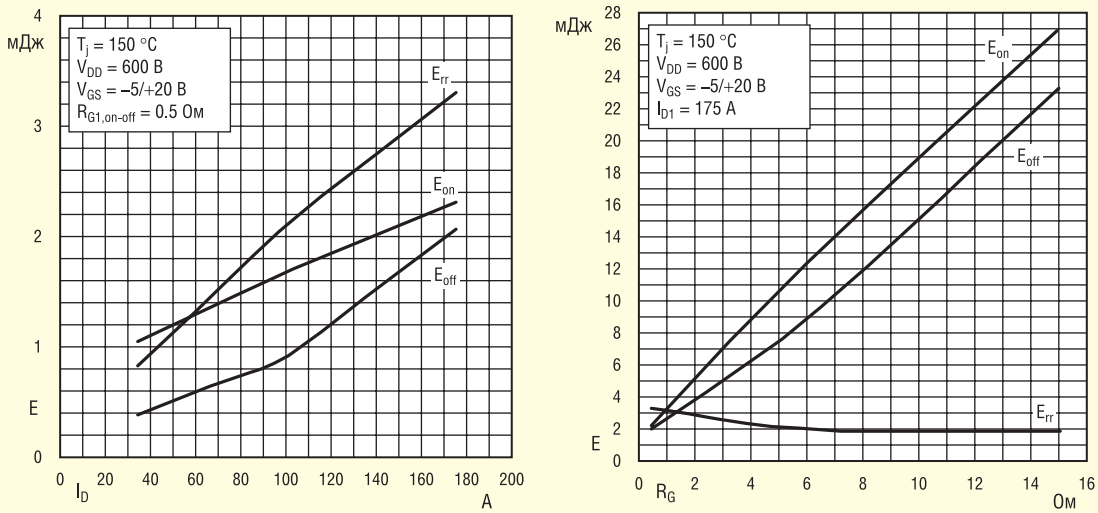


**Рис. 13. Приклади технічних характеристик з технічного опису модуля SKM350MB120SCH15 [5]**

| | | | |
|---|---|---|---|
| $C_j$ | паралельно до $C_{oss}$, f = 1 МГц, $V_R$ = 600 В<br>$T_j$ = 25 °C | 0.42 | нФ |
| $Q_c$ | $V_R$ = 800 В, $di/dt_{off}$ = 500 А/мкс<br>$T_j$ = 25 °C | 0.33 | мкС |

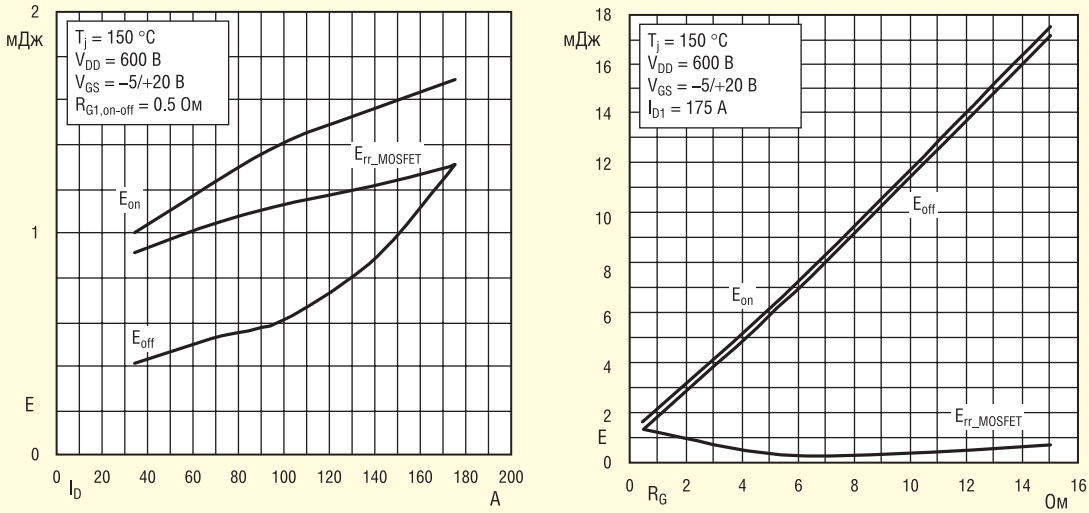


**Рис. 14. Приклади технічних характеристик з технічного опису SKM350MB120SCH17 [6]**

| | | | |
|---|---|---|---|
| $C_j$ | f = 1 МГц, $V_R$ = 800 В, $T_j$ = 25 °C<br>паралельно до $C_{oss}$ | 0.68 | нФ |
| $Q_c$ | $V_R$ = 800 В, $di/dt_{off}$ = 500 А/мкс | 0.53 | мкС |

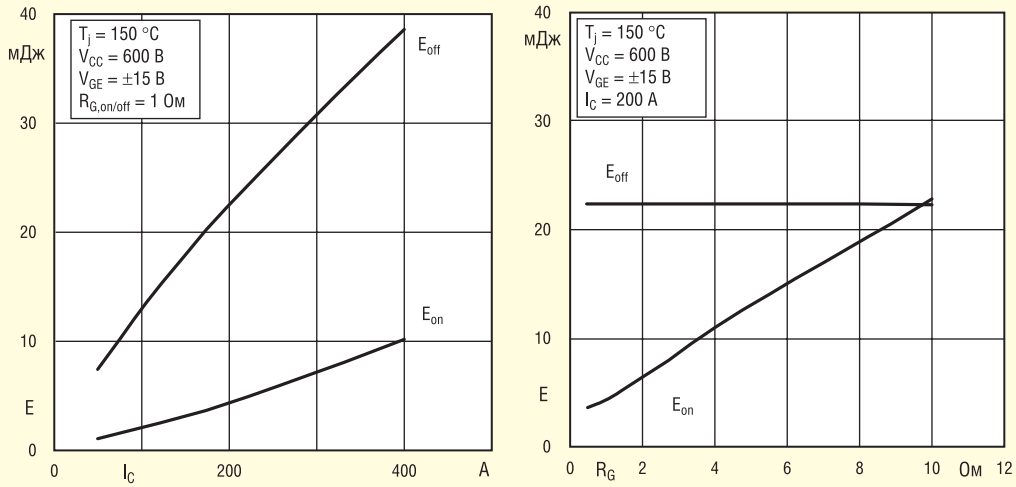


**Рис. 15. Приклади технічних характеристик з технічного опису SKM200GB12T4SiC2 [4]**

## IGBT і діод із бар'єром Шотткі (гібридний модуль)

Так звані гібридні модулі з Si IGBT та SiC SBD визначають $Q_c$ для діодного режиму, але не визначають параметри $Q_{rr}$, $I_{rr}$, $E_{rr}$ тощо. Ризик паразитного ввімкнення ($E_{pto}$) IGBT практично дорівнює нулю при напрузі вимикання затвора –15 В. Швидкість зміни напруги $dv/dt$ також набагато нижча порівняно з будь-яким модулем SiC MOSFET. Під час вимикання діода використовується лише діод Шотткі. SBD не створює енергії втрат $E_{rr}$, тому його не вказують у технічних характеристиках. Ємність $C_j$ та реактивна енергія $Q_c$ включені у технічні характеристики (рис. 15) для розрахунку енергії $E_{Cj}$.

| | | | |
|---|---|---|---|
| $C_j$ | f = 1 МГц, $V_R$ = 800 В, $T_j$ = 25 °C | 0.340 | нФ |
| $Q_c$ | $V_R$ = 800 В, di/dt = 500 А/мкс, $T_j$ = 25 °C | 0.26 | мкС |

**Рис. 16. Приклади значень з технічного опису SKKE60S12 [7]**

## Тільки діод із бар'єром Шотткі

Коли SBD використовується окремо, у технічних характеристиках вказані лише ємності $C_j$ та $Q_c$ для опису динамічної поведінки.

На рисунку 16 показано ці значення для модуля SKKE60S12, який є окремим SBD у корпусі SEMIPACK2. Як зазначалося раніше, SBD не створюють зворотного відновлюваного заряду внаслідок рекомбінації. Тому, коли його використовують окремо, жодні інші динамічні значення або криві не потрібні для опису роботи SiC SBD (наприклад, у випрямлячі або понижувально-підвищувальному перетворювачі).

## ВИСНОВОК

Впровадження карбіду кремнію дозволило виробляти діоди із бар'єром Шотткі для вищої напруги. Ці діоди відрізняються від традиційних кремнієвих p-n діодів деякими важливими аспектами. Відсутність струму зворотного відновлення може здатися нелогічною, але переваги є суттєвими, особливо у варіантах застосування з високою частотою комутації.

**Більш детальну інформацію щодо продукції Semikron Danfoss можна отримати, звернувшись до офіційного дистриб'ютора в Україні — ТОВ НВП «Техносервіс-привід»:**

**03057, м. Київ,**
**пр-т Берестейський, 56,**
**офіс 335,**
**тел. +38 (044) 458-47-66,**
**e-mail: sp.tsdrive@gmail.com,**
**www.tsdrive.com.ua,**
**www.semismart.com.ua**

*Література:*

1. *www.semikron-danfoss.com*
2. *A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, «Application Manual Power Semiconductors», 2nd edition, ISLE Verlag 2015, ISBN 978-3-938843-83-3.*
3. *Understanding the Turn-off Behaviour of SiC MOSFET Body Diodes in Fast Switching Applications, P. Sochor et al., PCIM Europe digital days 2021*
4. *SKM200GB12T4SiC2 Datasheet, Retrieved 2021-11-09, www.semikron-danfoss.com*
5. *SKM350MB120SCH15 Datasheet Rev. 1.0, Retrieved 2021-10-07, www.semikron-danfoss.com*
6. *SKM350MB120SCH17 Datasheet Rev. 1.0, Retrieved 2021-10-07, www.semikron-danfoss.com*
7. *SKKE60S12 Datasheet Rev. 1.0, Retrieved 2021-10-07, www.semikron-danfoss.com*

CN