

# SiC-диоды Шоттки:

## снижение потерь в режиме жесткой коммутации

**Замена кремниевых сверхбыстрых (Ultrafast) Si-диодов с плавной характеристикой восстановления, используемых в качестве оппозитных IGBT в режиме жесткой коммутации, на карбидокремниевые диоды Шоттки (SiC Schottky) позволяет снизить коммутационные потери в диоде на 80% и в IGBT на 50%.**

Джим Ричмонд  
(Jim Richmond)

Перевод:  
Евгений Карташов  
Валерия Смирнова

cree@macrogroup.ru

### Введение

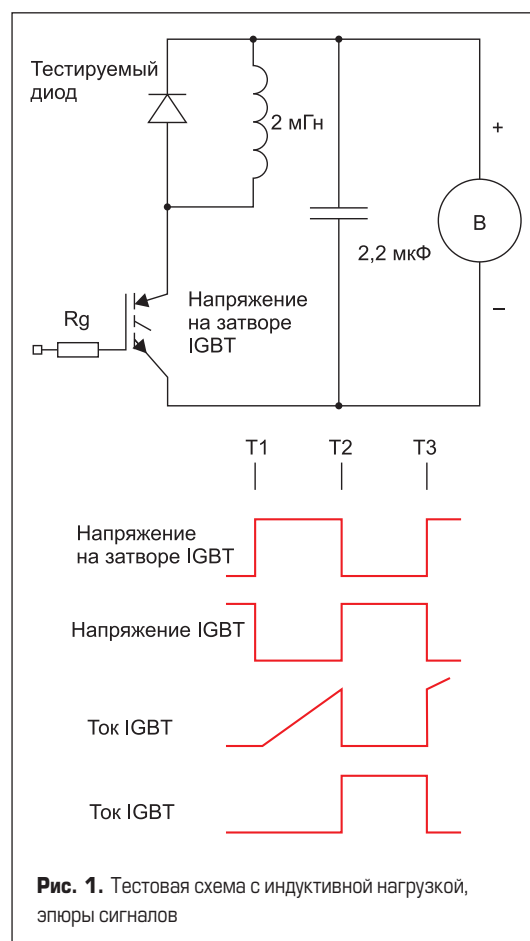
Кремниевый (Si) IGBT, сочетающий в себе выходные и динамические характеристики биполярного транзистора и легкость управления MOSFET, стал основным силовым ключом, используемым в режиме жесткой коммутации в высоковольтных (более 500 В) и мощных (более 500 Вт) устройствах. К типичным областям применения относятся инверторы приводов, источники бесперебойного питания, сварочное оборудование и импульсные источники питания (SMPS).

Постоянно растущий спрос на повышение эффективности, упрощение системы охлаждения, уменьшение габаритов элементов силовой электроники, а также более строгие требования к уровню излучаемых помех EMI/RFI и качеству электроэнергии создают новые проблемы для разработчиков. Выполнение этих требований в значительной степени связано со снижением потерь включения IGBT при работе на индуктивную нагрузку в режиме жесткой коммутации. Ток обратного восстановления, наблюдаемый при выключении кремниевых оппозитных диодов, напрямую влияет на потери включения IGBT. Проблема усугубляется тем, что ток обратного восстановления увеличивается с повышением рабочей температуры, тока и  $di/dt$ .

Ток обратного восстановления диода и коммутационные потери IGBT могут быть существенно снижены при замене кремниевых оппозитных PiN-диодов на SiC-диоды с барьером Шоттки (SBD). Из-за особенностей кремния изготовить Si-диоды Шоттки с рабочим напряжением выше 200 В невозможно.

### SiC-диоды Шоттки

SiC SBD выпускаются с номинальным напряжением 600 и 1200 В, 600-В диоды выпускаются с током 1, 4, 6, 10 и 20 А, 1200-В имеют номинальный ток 5 и 10 А. Основным преимуществом высоковольтных SiC SBD являются отличные динамические характеристики. Они имеют крайне низкий заряд обратного восстановления  $Q_{rr}$ , который обусловлен барьерной емкостью, а не накоплением заряда. Кроме того, в отличие от Si-PiN-диодов, этот заряд не зависит от  $di/dt$ , прямого тока и температуры. Максимальная температура кристалла +175 °C у SiC SBD является фактической рабочей температурой. Сверхнизкая величина  $Q_{rr}$  диодов SiC SBD позволяет уменьшить уровень коммутационных потерь в типовых схемах на основе IGBT, работающих в режиме жесткого переключения. В результате снижается температура корпуса IGBT, повышается эффективность системы, что даже дает возможность использовать менее мощный IGBT. Для оценки преимуществ этих высокопроизводительных диодов была использована тестовая схема



с индуктивной нагрузкой, позволяющая измерить динамические потери IGBT и диодов. Это позволило провести сравнение потерь переключения сверхбыстрого кремниевого Si-диода с плавным восстановлением и SiC Cree Zero Recovery SBD и оценить влияние процесса их восстановления на потери переключения IGBT.

### Измерительное оборудование

На рис. 1 показана схема, предназначенная для измерения характеристик переключения. В процессе работы на затвор IGBT подается двойной импульс. При тестировании 600-В прибора использовался резистор затвора 10 Ом для задания скорости коммутации 750 А/мкс. Для IGBT 12-го класса использовался резистор 22 Ом, при этом  $di/dt = 250$  А/мкс.

В момент времени T1 IGBT включается, и ток через индуктор увеличивается до тех пор, пока не достигнет требуемого значения в момент T2. При этом IGBT выключается, и ток индуктивности перекоммутируется в диод. Потери включения IGBT и потери включения диодов измеряются в переходном процессе T2.

В момент T2 IGBT выключается, и ток индуктора переходит на противоположный диод. Потери выключения IGBT и потери включения диодов измеряются в переходном процессе T2. Ток индуктора продолжает течь через диод до тех пор, пока IGBT не будет включен во время T3. Теперь ток индуктора передается из диода обратно в IGBT. Потери включения IGBT и потери выключения диода измеряются в переходном процессе T3.

### Сравнение характеристик переключения

Параметры коммутации измерялись для 15-А/600-В Ultrafast Si-диода с плавной характеристикой восстановления (такой же используется совместно с 40-А Ultrafast IGBT) и 10-А SiC SBD вместе с потерями 40-А/600-В Si-IGBT. Измерение потерь проводилось при напряжении 500 В и токе 20 А.

На рис. 2 показаны эпюры напряжения, тока и мгновенной мощности, измеренные при выключении Ultrafast Si-диода при температуре кристалла +150 °С. Пик тока обратного восстановления достигает 23 А, время восстановления — 100 нс, пиковая мгновенная мощность — 7 кВт. На рис. 2 видно перенапряжение 200 В, вызванное высокой скоростью изменения тока  $di/dt$  при обратном восстановлении.

На рис. 3 показаны эпюры выключения SiC SBD при +150 °С. Пик тока обратного восстановления здесь 4 А (снижение на 83%), время

восстановления 33 нс (снижение на 67%), максимальная мгновенная мощность — 0,5 кВт (снижение на 93%). Резкое сокращение мощности переключения обусловлено тем, что SiC SBD должен рассеять лишь небольшой емкостной заряд, и это происходит при низком напряжении на диоде. Перенапряжение, формируемое при коммутации Si-диода, полностью отсутствует у SiC SBD.

На рис. 4 показаны эпюры напряжения, тока и мгновенной мощности при включении IGBT с Ultrafast Si-диодом, измеренные при температуре кристалла +150 °С. Во время включения транзистора ток обратного восстановления диода добавляется к току IGBT, что создает пик, достигающий 44 А. Пиковая мгновенная мощность 15 кВт рассеивается в IGBT. Кроме того, видны высокочастотные колебания на IGBT, возникающие при резком выключении кремниевого диода. Это является одной из основных причин генерации радиочастотных/электромагнитных помех.

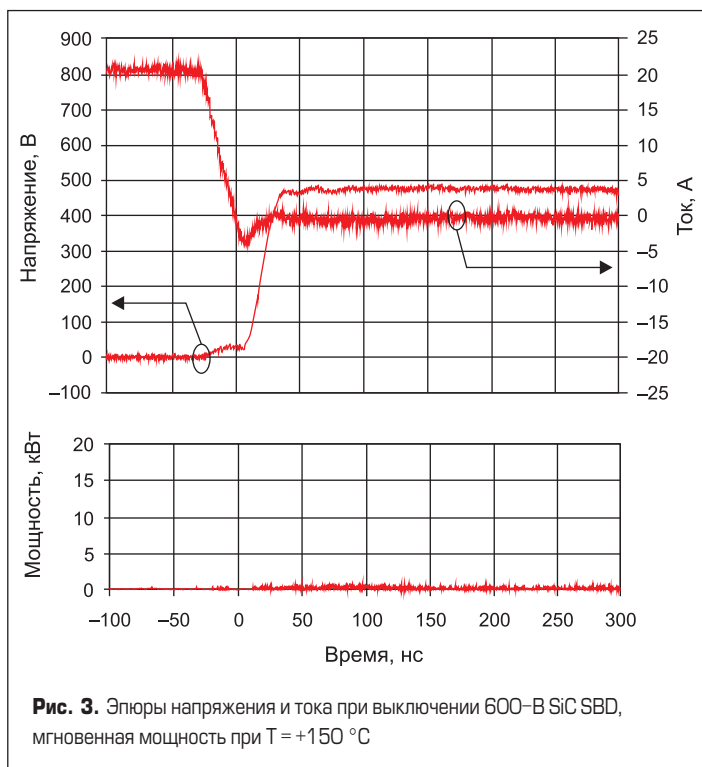


Рис. 3. Эпюры напряжения и тока при выключении 600-В SiC SBD, мгновенная мощность при T = +150 °С

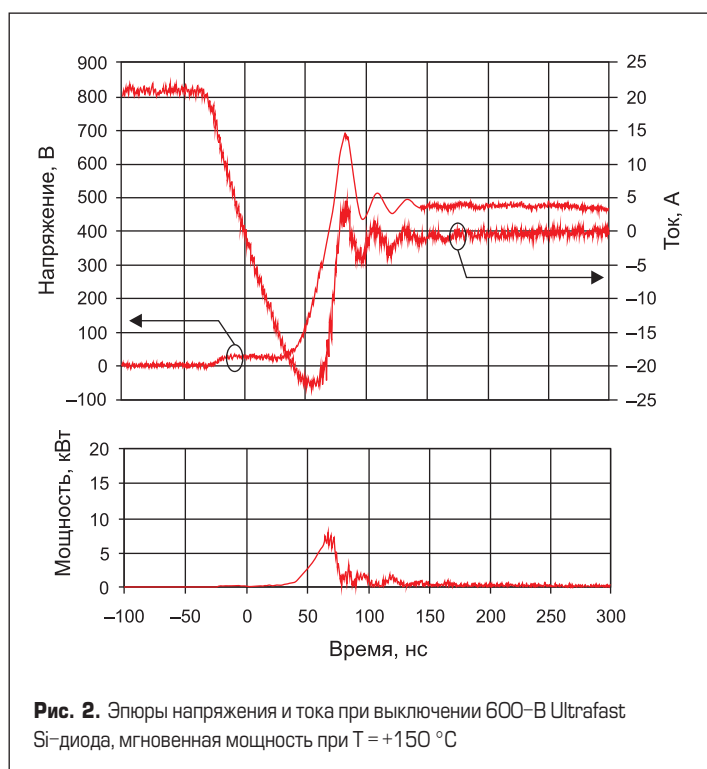


Рис. 2. Эпюры напряжения и тока при выключении 600-В Ultrafast Si-диода, мгновенная мощность при T = +150 °С

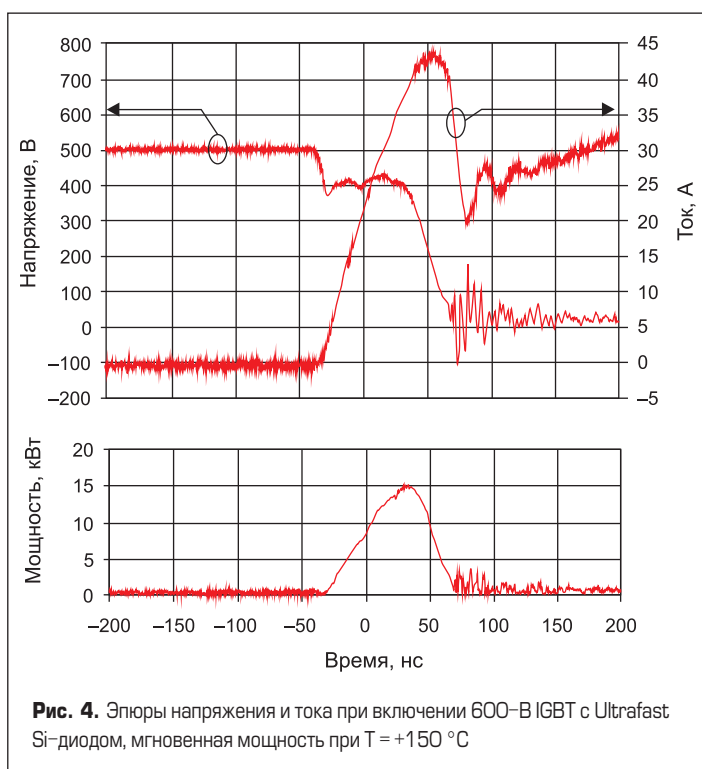
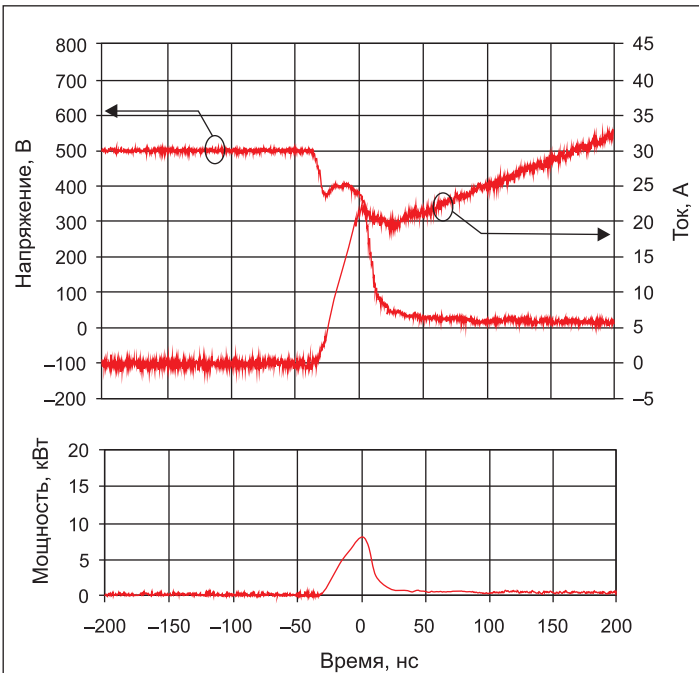
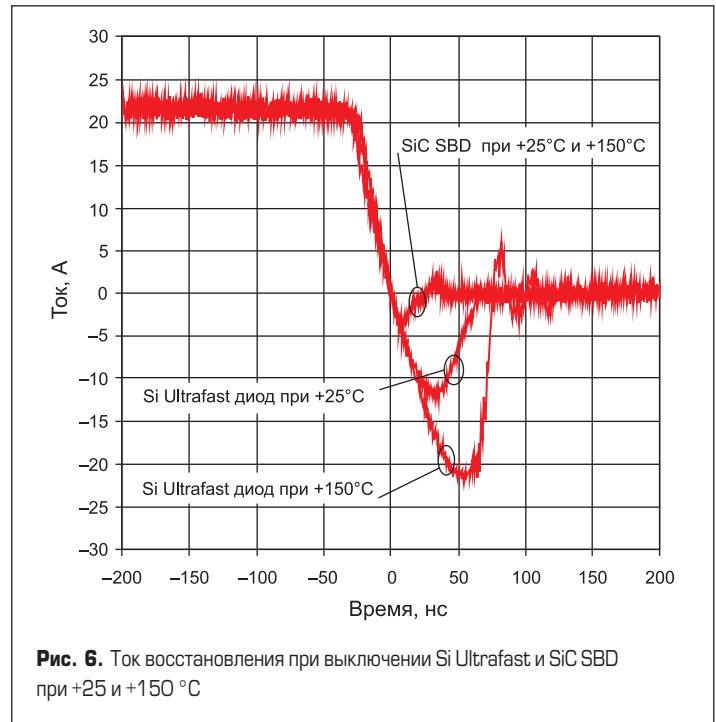


Рис. 4. Эпюры напряжения и тока при включении 600-В IGBT с Ultrafast Si-диодом, мгновенная мощность при T = +150 °С



**Рис. 5.** Эпоэры напряжения и тока при включении 600-В IGBT с SiC SBD, мгновенная мощность при T = +150 °C



**Рис. 6.** Ток восстановления при выключении Si Ultrafast и SiC SBD при +25 и +150 °C

**Таблица 1.** Сравнение параметров SiC SDB и Ultrafast Si-диодов (600 В) при различных значениях  $T_j(I_C = 20 \text{ A}, V_{CC} = 500 \text{ В}, R_{\theta j} = 10 \text{ Ом})$

Параметр	Si Pin при +25/+150 °C	SiC при +25/+150 °C	% снижения при +25/+150 °C
Пик тока восстановления $I_{pr}$ , А	13/23	4	69/83
Время обратного восстановления $T_{rr}$ , нс	83/100	30/33	64/67
Заряд восстановления $Q_{rr}$ , нс	560/1220	78/82	86/93
Потери выключения диода $E_{off, di}$ , мДж	0,11/0,23	0,02	82/91
Потери включения диода $E_{on, di}$ , мДж	0,03	0,02	33
Потери общие диода $E_{td, di}$ , мДж	0,14/0,26	0,04	71/85
Потери выключения IGBT $E_{off, IGBT}$ , мДж	0,63/0,94	0,23/0,24	63/74
Потери включения IGBT $E_{on, IGBT}$ , мДж	0,46/0,89	0,32/0,64	30/29
Потери общие IGBT $E_{td, IGBT}$ , мДж	1,09	0,55/0,64	50/28
Потери общие $E_{tr}$ , мДж	1,23/2,09	0,59/92	52/56

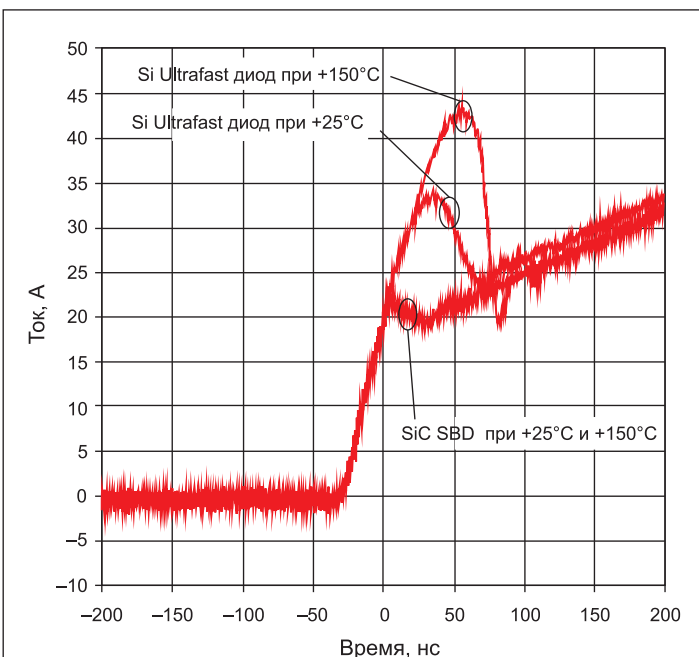
На рис. 5 показаны эпоэры напряжения, тока и мгновенной мощности при включении IGBT с SiC SBD, измеренные при температуре кристалла +150 °C. Использование SiC SBD позволяет снизить пик тока до 22 А (на 50%), а максимальную мгновенную мощность до 7,5 кВт (снижение на 50%). Также видно, что при этом отсутствуют высокочастотные осцилляции, что приводит к уменьшению генерации помех RFI/EMI.

Сравнение параметров переключения SiC SDB и Ultrafast Si-диодов приведено для температур кристалла +25 и +150 °C в таблице 1. Можно видеть, что общее снижение потерь переключения (IGBT + диод) составляет 52% при +25 °C и 56% при +150 °C.

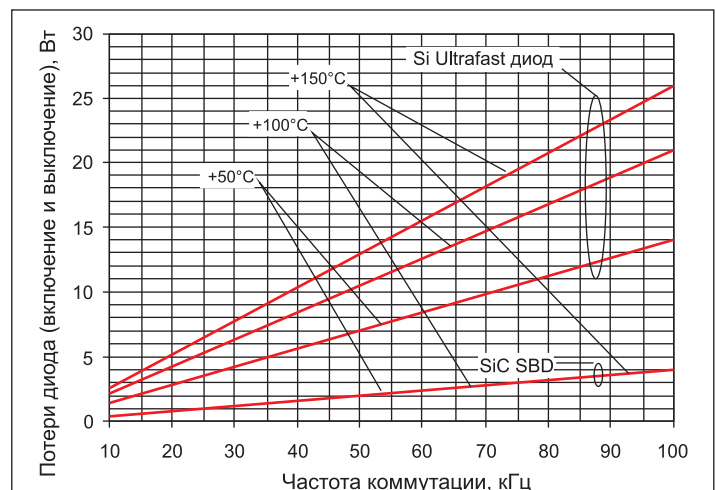
На рис. 6 показаны токи выключения Si Ultrafast и SiC SBD при +25 и +150 °C, наложенные в одном масштабе. Параметры SiC SBD не зависят от температуры, пиковый ток восстановления — 5 А. Ток восстановления Ultrafast Si-диода заметно меняется с температурой, увеличиваясь с 13 А при +25 °C до 23 А при +150 °C.

На рис. 7 показаны кривые токов включения IGBT с Si Ultrafast и SiC SBD при температуре +25 и +150 °C, наложенные друг на друга. Пиковый ток IGBT с SiC SBD не зависит от температуры. Вариант с диодом Si Ultrafast показывает сильную температурную зависимость, связанную с высокой термозависимостью тока обратного восстановления.

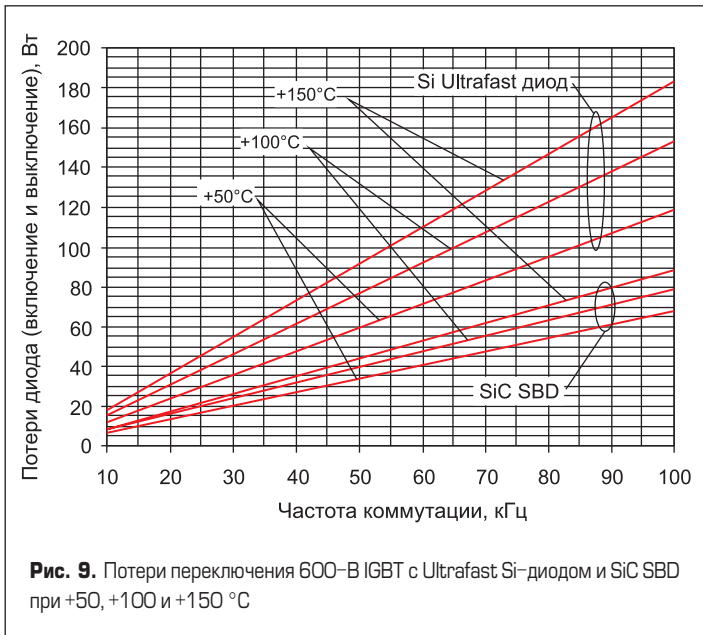
На рис. 8 показаны суммарные динамические потери диода (включение и выключение) при частоте коммутации от 10 до 100 кГц и тем-



**Рис. 7.** Ток восстановления при включении Si Ultrafast и SiC SBD при +25 и +150 °C



**Рис. 8.** Потери переключения 600-В Si Ultrafast и SiC SBD при +50, +100 и +150 °C

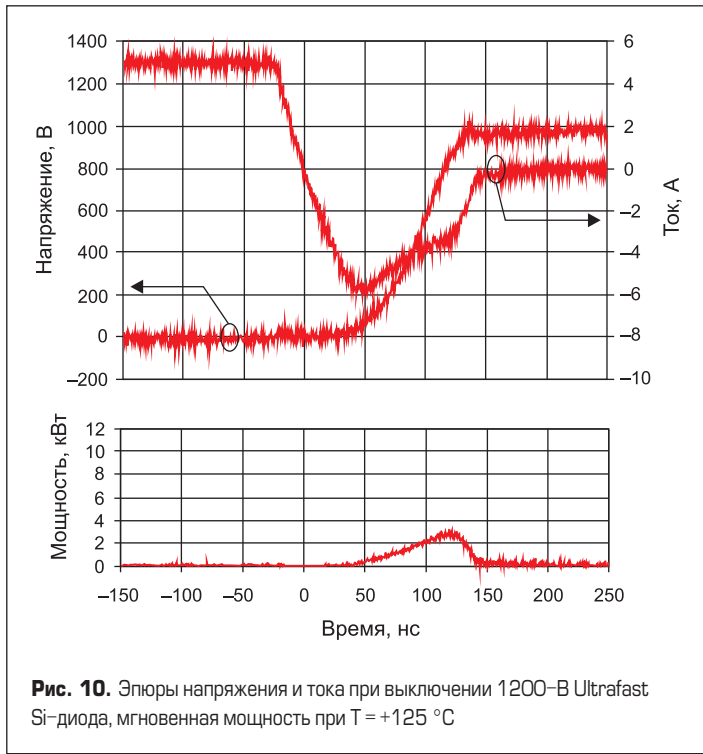
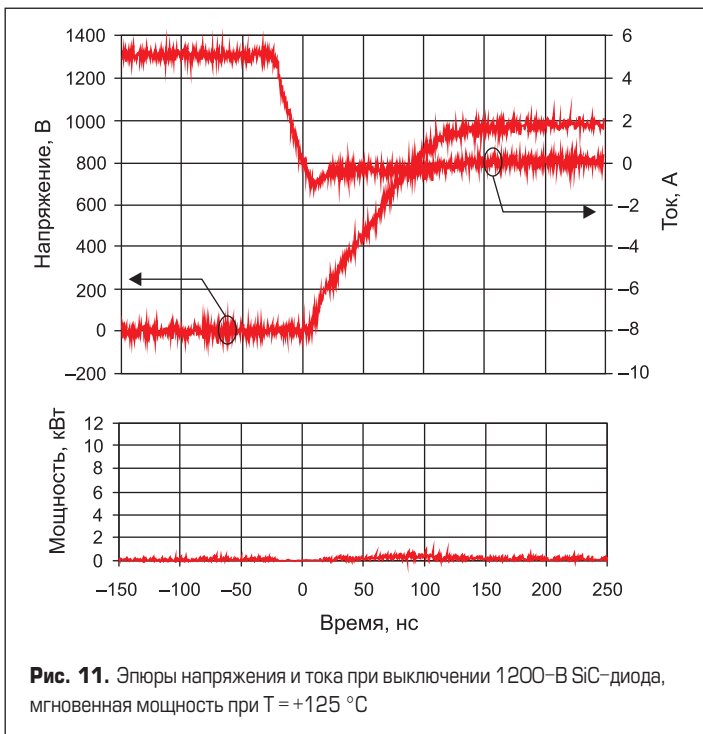


платуре +50, +100 и +150 °C. SBD имеет значительно меньшие потери (снижение до 85%), не меняющиеся с ростом температуры.

На рис. 9 показаны суммарные динамические потери IGBT (включение и выключение) при частоте коммутации от 10 до 100 кГц и температуре +50, +100 и +150 °C. Потери транзистора с SiC SBD примерно в два раза ниже, чем с Ultrafast Si-диодом. Этот вариант также демонстрирует гораздо меньшую зависимость от температуры. Температурная зависимость потерь переключения IGBT с SiC SBD обусловлена увеличением времени выключения транзистора, при этом потери включения не меняются с нагревом прибора. Такое заметное улучшение динамических свойств IGBT объясняется, в первую очередь, отсутствием процесса обратного восстановления SiC SBD.

**Сравнение характеристик переключения 1200-В приборов**

Параметры переключения измерялись для 8 А/1200 В Ultrafast Si-диода (такой же используется совместно с 11-А сверхбыстрым IGBT) и 5-А SBD, вместе с потерями 11 А/1200 В IGBT. Измерение потерь проводилось при напряжении 1000 В и токе 5 А. Максимальная темпе-



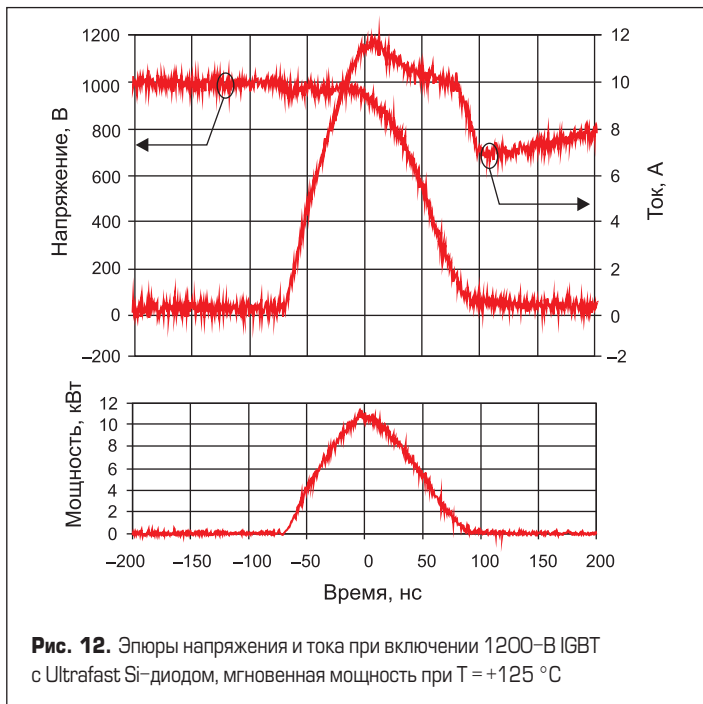
ратура кристалла при испытаниях составляла +125 °C, поскольку при температуре +150 °C начинается тепловое «убегание» IGBT.

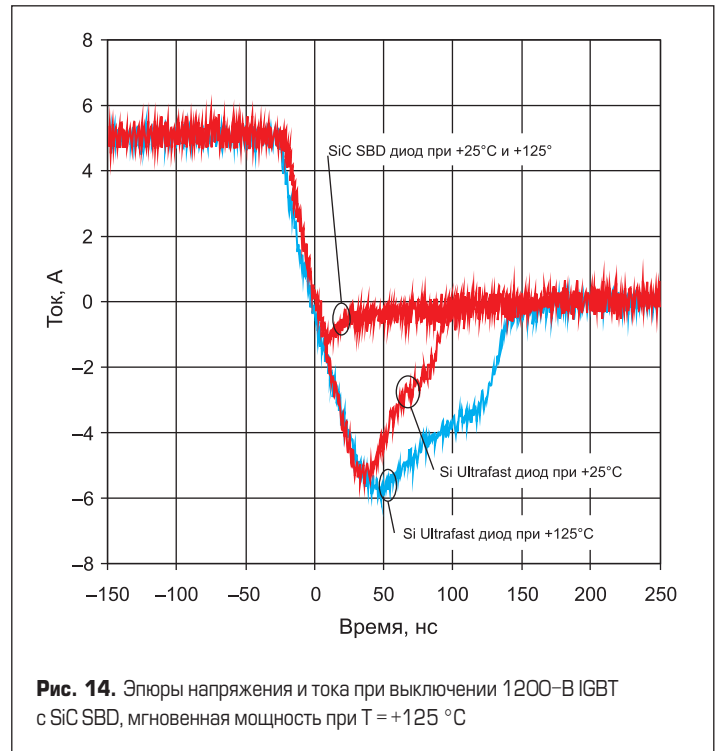
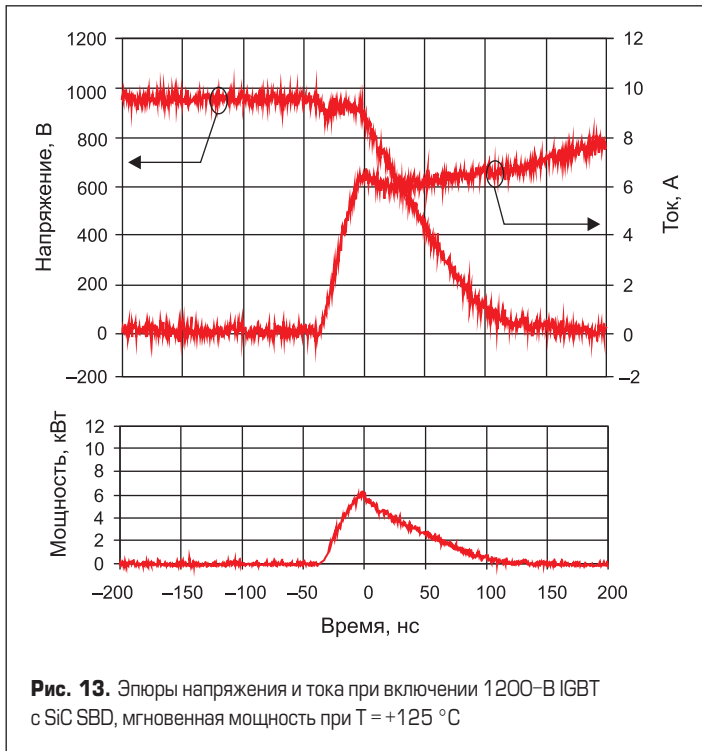
На рис. 10 показаны эпюры напряжения, тока и мгновенной мощности при выключении Ultrafast Si-диода при температуре кристалла +125 °C. Пик тока обратного восстановления достигает 6 А, время восстановления — 148 нс, мгновенная пиковая мощность — 2,8 кВт. Перенапряжение на 600-В Si-диоде не является ярко выраженным, поскольку тестирование происходило при низком значении  $di/dt$  (250 вместо 750 А/мкс).

На рис. 11 показано выключение SiC SBD при температуре кристалла +125 °C.

Использование SiC SBD позволяет уменьшить пик тока до 1 А (снижение на 83%), время восстановления — до 30 нс (снижение на 80%), а максимальную мгновенную мощность — до 0,3 кВт (снижение на 89%). Такое значительное уменьшение пиковой мощности объясняется тем, что SBD рассеивает только емкостной заряд при низком напряжении.

На рис. 12 показаны эпюры напряжения, тока и мгновенной мощности при включении IGBT с Ultrafast Si-диодом при температуре кри-

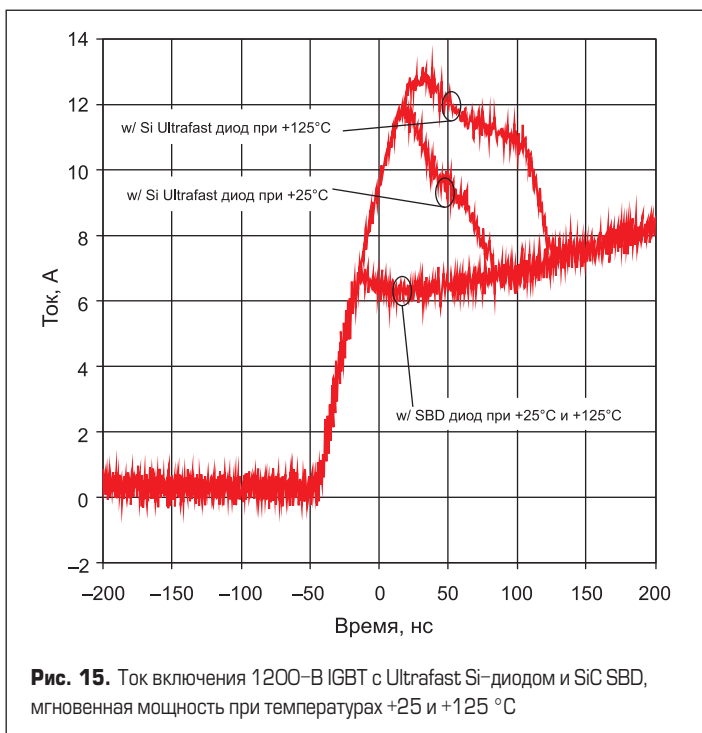




сталла  $+125^\circ\text{C}$ . В процессе включения ток обратного восстановления диода добавляется к току IGBT, что создает пик 11,7 А. Мгновенная мощность, рассеиваемая при этом транзистором, составляет 11 кВт.

На рис. 13 показаны эпюры напряжения, тока и мгновенной мощности при включении IGBT с SBD при температуре кристалла  $+125^\circ\text{C}$ . Использование SBD позволяет уменьшить пик тока до 6,7 А (снижение на 42%), а максимальную мгновенную мощность — до 6,2 кВт (снижение на 44%).

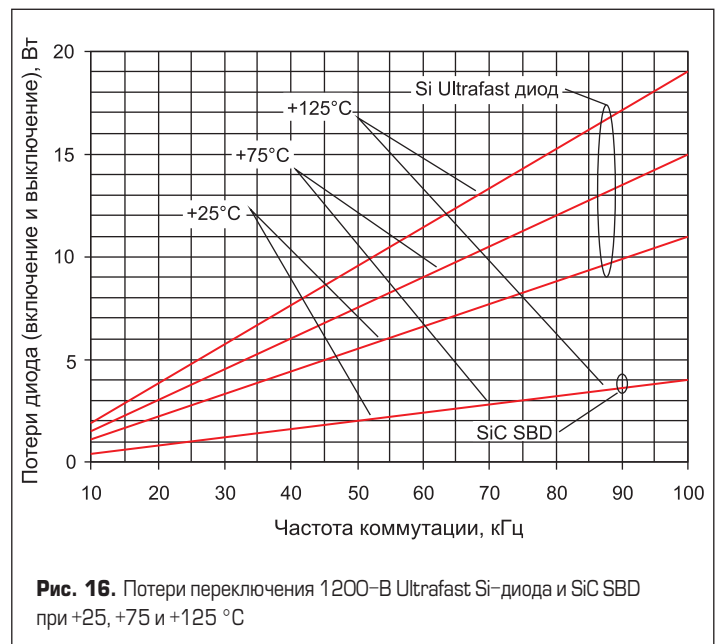
На рис. 14 показаны эпюры токов выключения Ultrafast Si-диода и SiC SBD при температуре  $+25^\circ\text{C}$  и  $+125^\circ\text{C}$ , наложенные друг на друга. Параметры SiC SBD неизменны с температурой, пиковый ток восстановления — 1 А. Диоды Si Ultrafast демонстрируют сильную температурную зависимость, ток увеличивается с 5 А при  $+25^\circ\text{C}$  до 6 А при  $+150^\circ\text{C}$ . Время обратного восстановления Si Ultrafast растет со 100 нс при  $+25^\circ\text{C}$  до 148 нс при  $+125^\circ\text{C}$ , в то время как параметр  $t_{rr}$  у SiC SBD при тех же условиях остается неизменным.



На рис. 15 показаны эпюры токов включения IGBT с Ultrafast Si-диодом и SiC SBD при температуре  $+25^\circ\text{C}$  и  $+125^\circ\text{C}$ , наложенные друг на друга. Пиковый ток и время обратного восстановления IGBT с Ultrafast Si-диодом демонстрируют сильную температурную зависимость вследствие термозависимости процесса обратного восстановления.

В таблице 2 приведено сравнение параметров переключения SiC SBD и Ultrafast Si-диодов для температур кристалла  $+25^\circ\text{C}$  и  $+125^\circ\text{C}$ . Все измерения показывают значительное превосходство SiC SBD. Их параметры остаются неизменными с увеличением температуры, в то время как у Ultrafast Si-диодов потери растут. Общее снижение потерь переключения (IGBT + диод) составляет 51% при  $+25^\circ\text{C}$  и 58% при  $+125^\circ\text{C}$ .

На рис. 16 показаны суммарные динамические потери диода (включение и выключение) при частоте коммутации от 10 до 100 кГц и температурах  $+25^\circ\text{C}$ ,  $+75^\circ\text{C}$  и  $+125^\circ\text{C}$ . SiC SBD имеет значительно меньшие потери переключения (снижение до 75%), которые не зависят от температуры.



**Таблица 2.** Сравнение параметров SiC SDB и Ultrafast Si-диодов (600 В) при различных значениях  $T_j$  ( $I_C = 5$  А,  $V_{CC} = 1000$  В,  $R_{\theta g} = 22$  Ом)

Параметр	Si Pin при +25/+150 °С	SiC при +25/+150 °С	% снижения при +25/+150 °С
Пик тока восстановления $I_{PR}$ , А	5,5/6	1	82/83
Время обратного восстановления $T_{rr}$ , нс	100/148	30	70/80
Заряд восстановления $Q_{rr}$ , нс	295/540	20	93/95
Потери выключения диода $E_{off,di}$ , мДж	0,08/0,16	0,02	75/88
Потери включения диода $E_{on,di}$ , мДж	0,03	0,02	33
Потери общие диода $E_{\Sigma,di}$ , мДж	0,11/0,19	0,04	64/79
Потери выключения IGBT $E_{off,IGBT}$ , мДж	0,73/0,98	0,28	62/71
Потери включения IGBT $E_{on,IGBT}$ , мДж	0,33/0,57	0,25/0,41	24/28
Потери общие IGBT $E_{\Sigma,IGBT}$ , мДж	1,06/1,55	0,53/0,69	50/55
Потери общие $E_{\Sigma}$ , мДж	1,17/1,74	0,57/0,73	51/58

На рис. 17 показаны суммарные динамические потери IGBT (включение и выключение) при частоте коммутации от 10 до 100 кГц и температурах +25, +75 и +125 °С. Потери транзистора с SiC SBD примерно в два раза ниже, чем с Si Ultrafast. У этого варианта также меньше температурная зависимость потерь. Ее наличие объясняется тем, что с ростом температуры растет время выключения, а потери включения остаются при этом неизменными. Такое заметное улучшение динамических свойств IGBT объясняется, в первую очередь, отсутствием процесса обратного восстановления SiC SBD.

**Потери проводимости и общие потери**

На рис. 18 показана прямая вольт-амперная характеристика 1200-В Ultrafast Si-диода и SiC SBD при температурах +25 и +125 °С. При токе 5 А прямое падение напряжения SiC SBD меньше на 0,75 В при 25 °С и на 0,18 В при +125 °С, таким образом, SiC-диод имеет меньшие потери проводимости.

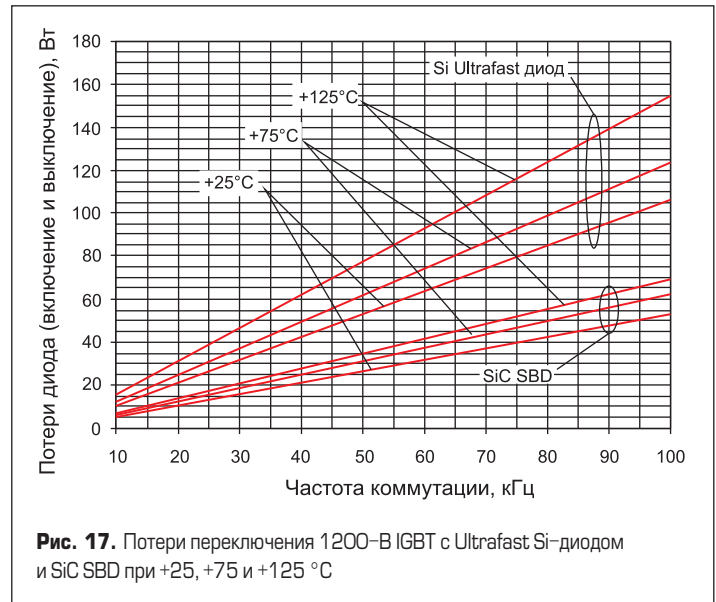
В таблице 3 приведены расчеты суммарных потерь для преобразователя на модулях 12-го класса, работающего с частотой коммутации 100 кГц с коэффициентом заполнения 50% при среднем токе 2,5 А. Расчеты делались для температуры кристаллов +125 °С. Справочное значение потерь проводимости IGBT составляет 2,9 В при 5 А. При использовании SiC SBD общие потери диода уменьшаются на 50%, а потери IGBT — на 51%. Таким образом, простая замена Ultrafast Si-диодов на SiC SBD обеспечивает снижение потерь 1200-В конвертера на 51%.

**Заключение**

Потери включения IGBT в значительной степени зависят от характеристик обратного восстановления оппозитного диода. Параметры SiC SBD оказывают большое влияние на динамические свойства как самого диода, так и IGBT в режиме жесткой коммутации. Представленные выше результаты измерений демонстрируют значительные преимущества SiC-диодов Шоттки. В то время как ток обратного восстановления Ultrafast Si-диодов демонстрирует сильную зависимость от температуры, параметры SiC SBD остаются неизменными. При высоких значениях  $di/dt$  Ultrafast Si-диоды генерируют перенапряжение при выключении, в отличие от них SiC SBD практически не генерируют перенапряжения

**Таблица 3.** Сравнение расчетных значений потерь конвертера с 1200-В Ultrafast Si-диодами и SiC SBD при  $T_j = +125$  °С

Параметр	Si Pin	SiC	% снижения
Потери диода динамические, Вт	19	4	79
Потери диода статические, Вт	12,5	11,7	6
Потери общие диода, Вт	31,5	15,7	50
Потери IGBT динамические, Вт	155	69	55
Потери IGBT статические, Вт	14,5	14,5	0
Потери общие IGBT, Вт	169,5	83,5	51
Потери общие, Вт	201	99,2	51



благодаря отсутствию тока обратного восстановления. Резкое выключение Si Ultrafast создает паразитные осцилляции напряжения на IGBT, что, в свою очередь, приводит к генерации радиочастотных/электромагнитных помех. Этот эффект также отсутствует у SiC SBD.

Снижение потерь переключения на 50% можно использовать для оптимизации характеристик устройства несколькими различными способами. Например, это дает возможность увеличения эффективности преобразователя, снижения требований к системе охлаждения или использования IGBT с меньшим номинальным током. Также это позволяет увеличить рабочую частоту и, соответственно, уменьшить размеры пассивных компонентов или улучшить акустические характеристики. Отсутствие коммутационных перенапряжений устраняет необходимость в снабберных цепях. Отсутствие высокочастотных осцилляций уменьшает требования к фильтрам RFI/EMI. Замена Ultrafast Si-диодов на SiC-диоды Шоттки, такие как Cree Zero Recovery SBD, приводит к существенному снижению коммутационных потерь как в диоде, так и в IGBT, что дает значительное улучшение характеристик всей системы.

