

# Применение карбид-кремниевых диодов Шоттки

## в IGBT-инверторах с жестким переключением

**В статье рассмотрены вопросы применения карбид-кремниевых диодов Шоттки в качестве антипараллельных в инверторах с жестким переключением. Приведены экспериментальные результаты измерений составляющих потерь, прогнозы развития данного направления.**

**Александр Полищук**

a.polishuk@prosoft.ru

### Введение

За последнее десятилетие IGBT-транзисторы надежно зарекомендовали себя в качестве основных ключевых приборов для мощной преобразовательной техники [1]. Благодаря меньшим по сравнению с MOSFET статическим потерям, хорошим динамическим характеристикам и простоте управления, эти приборы нашли применение в мощных (более 500 Вт) высоковольтных (более 500 В) инверторах для различных устройств силовой электроники, таких как электроприводы, установки индукционного нагрева, источники бесперебойного питания и др.

Во всех перечисленных устройствах транзисторы инвертора работают в так называемом жестком режиме, когда их переключение происходит при максимальных значениях токов и напряжений. Специфической особенностью этого режима, связанной с работой на индуктивную нагрузку, также является необходимость установки антипараллельных диодов, характеристики обратного восстановления которых вносят значительный вклад в динамические потери. Ток обратного восстановления антипараллельного диода протекает через ключевой транзистор во время его открывания, что приводит к рассеиванию значительной мощности как в самом диоде, так и в IGBT. Кроме того, у кремниевых диодов энергия обратного восстановления увеличивается с ростом температуры и скорости изменения прямого тока  $di/dt$ , что всегда присутствует в реальных инверторах.

Радикально снизить ток обратного восстановления и связанные с ним динамические потери в IGBT позволяет замена кремниевых диодов Ultra Fast на высоковольтные карбид-кремниевые (SiC) диоды с барьером Шоттки.

### Высоковольтные SiC-диоды Шоттки

Карбид кремния — это высокотемпературный радиационно-стойкий полупроводниковый материал с большой шириной запрещенной энергетической зоны. Его уникальные свойства хорошо известны, поэтому напомним лишь некоторые из них [2]:

- Критическая напряженность электрического поля SiC более чем на порядок превышает соответствующи-

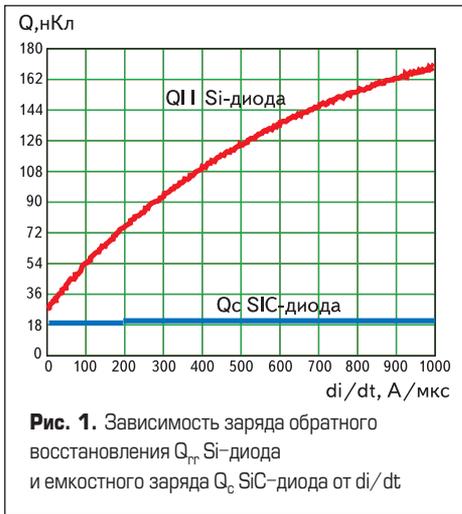
щие показатели у Si и GaAs. Это приводит к значительному снижению сопротивления в открытом состоянии  $R_{on}$ . Например, при напряжении 600 В SiC-диод имеет  $R_{on} \leftrightarrow 1,4 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$ , GaAs-диод —  $R_{on} \leftrightarrow 6,5 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$ , Si-диод —  $R_{on} > 70 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$ .

- Малое удельное сопротивление в открытом состоянии, в сочетании с высокой плотностью тока и теплопроводностью, позволяет использовать очень маленькие по размерам кристаллы для силовых приборов.
- Большая ширина запрещенной энергетической зоны является результатом более высокого барьера Шоттки по сравнению с Si и GaAs. В результате чрезвычайно малый ток утечки (менее 70 мкА при 200 °С) при повышенной температуре кристалла снижает термоэлектронную эмиссию за пределами барьера.
- Высокая теплопроводность SiC снижает тепловое сопротивление кристалла (по сравнению с Si-диодами — почти в два раза).
- Электронные свойства приборов на основе SiC очень стабильны во времени и слабо зависят от температуры, что обеспечивает высокую надежность изделий.
- Высокая рабочая температура кристалла (более 600 °С) позволяет создавать высоконадежные приборы для жестких условий эксплуатации.

Для рассматриваемого применения важным является то, что в отличие от кремниевых  $p-n$ -диодов выключение SiC  $p-i-n$ -диодов Шоттки не сопровождается процессом рассасывания заряда в  $n$ -области и ток обратного восстановления отсутствует. Существует лишь незначительный ток заряда емкости обратно смещенного перехода. Поэтому, по аналогии с зарядом обратного восстановления  $Q_{rr}$   $p-n$ -диодов, вводит понятие емкостного заряда  $Q_c$   $p-i-n$ -диодов Шоттки. На рис. 1 показаны зависимости зарядов  $Q_{rr}$  и  $Q_c$  от скорости спада тока через диод.

Можно видеть, что величина емкостного заряда практически не зависит от  $di/dt$ , во время как заряд обратного восстановления увеличивается, и соответственно растут потери на высоких частотах.

В настоящее время практически монополистом на рынке карбид-кремниевых полупроводниковых материалов является компания Cree. Это единственный



в мире производитель SiC-пластин большого диаметра (до 100 мм) в массовых количествах. Из всей номенклатуры перспективных полупроводниковых приборов SiC [2] коммерчески доступны пока лишь высоковольтные диоды Шоттки с напряжением 300–1200 В, номенклатура которых приведена в таблице 1.

**Замена антипараллельных Si-диодов на SiC-диоды Шоттки (эксперимент)**

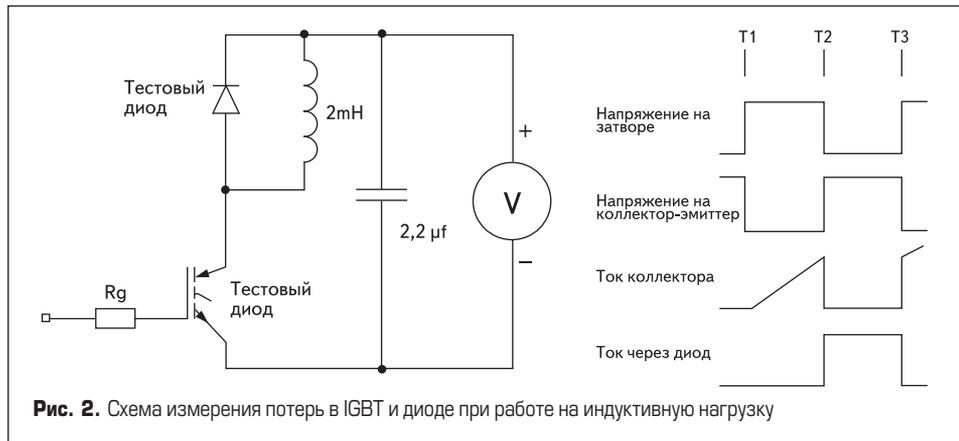
Для экспериментальной оценки результатов применения SiC-диодов Шоттки можно использовать стандартную модель (рис. 2), применяемую для измерения потерь в IGBT с интегрированным антипараллельным диодом [3].

Измерения проводились для двух вариантов ключевых приборов: с напряжением «коллектор — эмиттер» 600 и 1200 В. В первом случае скорость нарастания тока ограничена величиной 750 В/мкс с помощью затворного резистора  $R_g$  сопротивлением 10 Ом, во втором случае — 250 В/мкс при  $R_g = 22$  Ом.

В момент времени T1 (рис. 2) IGBT включается, и ток через индуктор нарастает

**Таблица 1.** Карбид-кремниевые диоды Шоттки Cree® ZeroRecovery™

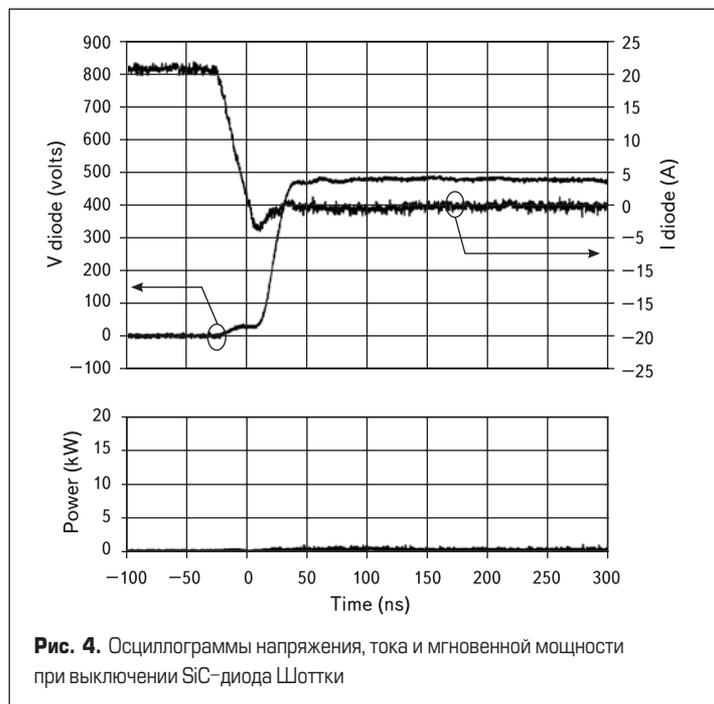
Наименование	Емкость, пФ @400 В, 1 МГц	Максимальное обратное напряжение, В	Постоянный прямой ток, А	Прямое падение напряжения, В	Тип корпуса
CSD01060A	8,5	600,0	1,0	1,6	TO220-2
CSD01060E	8,5	600,0	1,0	1,6	DPAK
CSD04060A	20,0	600,0	4,0	1,5	TO220-2
CSD04060E	20,0	600,0	4,0	1,5	DPAK
CSD06060A	30,0	600,0	6,0	1,6	TO220-2
CSD06060G	30,0	600,0	6,0	1,6	D2PAK
CSD10030A	58,0	300,0	10,0	1,2	TO220-2
CSD20030D	58,0	300,0	20,0	1,2	TO247-3
CSD20060D	50,0	600,0	20,0	1,5	TO247-3
CSD10060A	50,0	600,0	10,0	1,5	TO220-2
CSD05120A	33,0	1200,0	5,0	1,6	TO220-2
CSD10120A	59,0	1200,0	10,0	1,6	TO220-2
CSD20120D	59,0	1200,0	20,0	1,6	TO247-3



до момента времени T2. В момент T2 транзистор закрывается, и ток индуктора продолжает протекать через диод. Потери при выключении IGBT и отпирании диода измеряются на интервале активной области транзистора. На интервале T2–T3 ток индуктора протекает через диод до тех пор, пока транзистор не откроется и ток не начнет протекать через него. Потери при включении IGBT и запираии диода также измеряются на интервале нахождения транзистора в активной области.

**Результаты измерений потерь в IGBT с напряжением 600 В**

Измерения динамических характеристик проводились при использовании кремниевого Ultra Fast диода 15 А, 600 В с мягким восстановлением (аналогичного интегрируемому в IGBT с током коллектора 40 А) и SiC-диода Шоттки 10 А, 600 В типа CSD10060. Потери измерялись при напряжении питания 500 В и токе коллектора 20 А. Результаты измерений приведены на рис. 3–8.



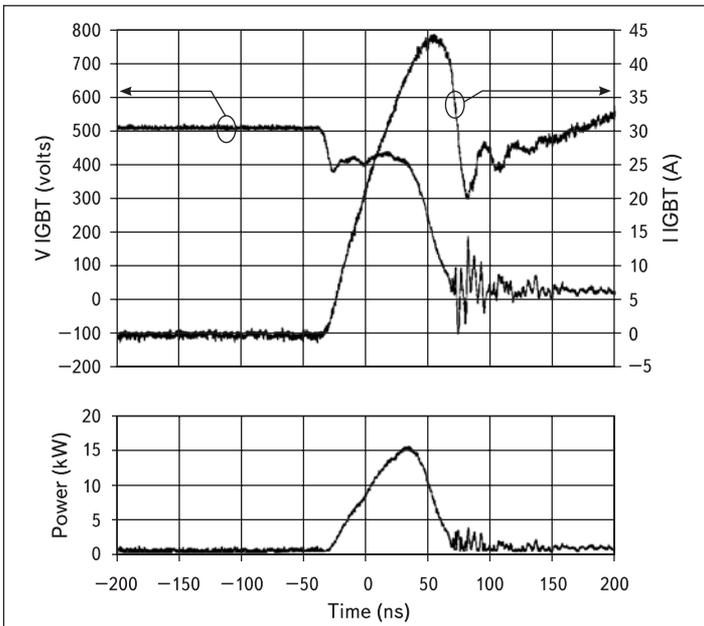


Рис. 5. Осциллограммы напряжения, тока и мгновенной мощности при включении IGBT совместно с кремниевым Ultra Fast диодом

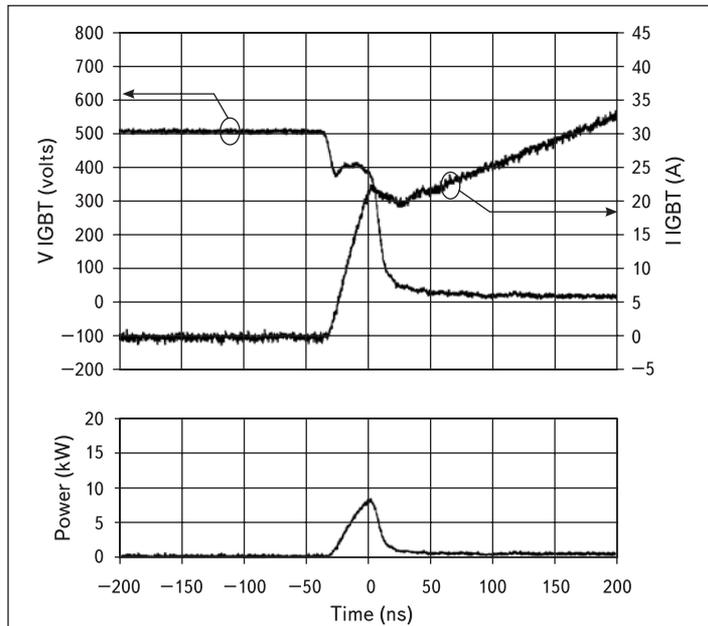


Рис. 6. Осциллограммы напряжения, тока и мгновенной мощности при включении IGBT совместно с SiC-диодом Шоттки

На рис. 3 показаны осциллограммы напряжения, тока и мгновенной мощности при выключении кремниевых Ultra Fast диода (температура перехода 150 °C). Из рисунка видно, что пиковый ток обратного восстановления достигает 23 А, время обратного восстановления — 100 нс, пиковая рассеиваемая мощность — 7 кВт. На осциллограмме обратного напряжения наблюдается выброс величиной около 200 В, обусловленный высоким значением di/dt при восстановлении диода.

Рис. 4 иллюстрирует те же процессы, что и приведенные на рис. 3, только при использовании SiC-диода Шоттки при температуре перехода 150 °C. Помимо снижения тока обратного восстановления (точнее, тока заряда емкости обратно смещенного перехода, поскольку у приборов с барьером Шоттки отсутствует эффект накопления заряда) до 4 А при полной длитель-

ности этого процесса 33 нс и пиковой рассеиваемой мощности до 0,5 кВт полностью отсутствует выброс обратного напряжения на диоде.

На рис. 5 показаны осциллограммы напряжения, тока и мгновенной мощности при включении IGBT совместно с кремниевым Ultra Fast диодом (температура перехода диода и транзистора 150 °C). При включении IGBT ток обратного восстановления диода суммируется с током транзистора, в результате чего его пиковое значение достигает 44 А. При этом на IGBT рассеивается пиковая мощность 15 кВт. На осциллограмме напряжения присутствует интенсивный высокочастотный переходной процесс, обусловленный высоким значением di/dt при восстановлении диода. Это является источником мощных электромагнитных помех, требующих дополнительных мер по их подавлению.

Процесс включения IGBT совместно с SiC-диодом Шоттки показан на рис. 6. Условия работы те же, что и в предыдущем случае. Как видно из рисунка, ток IGBT при включении снизился до 22 А при уменьшении рассеиваемой пиковой мощности в 2 раза (до 7,5 кВт). При этом высокочастотный переходной процесс на транзисторе не наблюдается.

В таблице 2 и 3 приведены сравнительные параметры переключения при использовании кремниевых Ultra Fast диода и SiC-диода Шоттки, измеренные при температуре 25 и 150 °C соответственно. Нетрудно видеть, что полные динамические потери в системе «IGBT + диод» удается снизить на 52% при температуре переходов 25 °C и на 56% — при 150 °C.

На рис. 7 и 8 показаны осциллограммы токов выключения кремниевых Ultra Fast и карбид-кремниевых диодов и включения IGBT

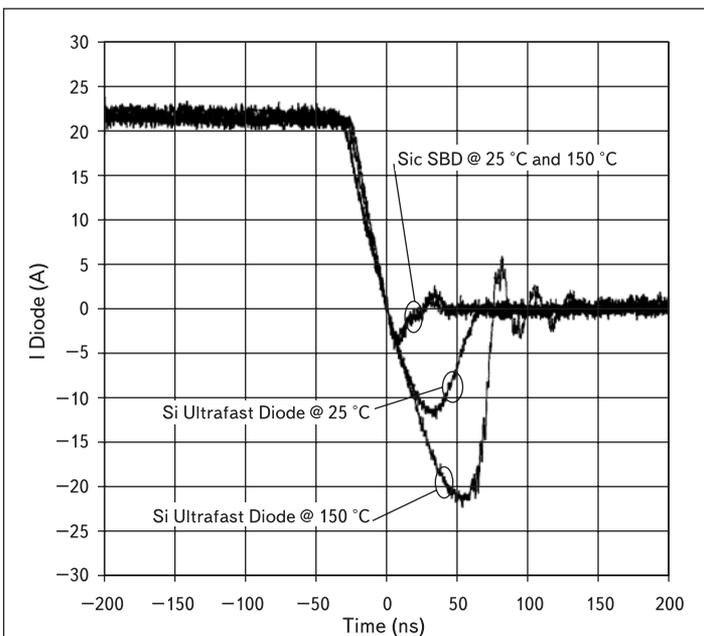


Рис. 7. Осциллограммы тока при выключении кремниевых Ultra Fast диода и карбид-кремниевых диодов Шоттки

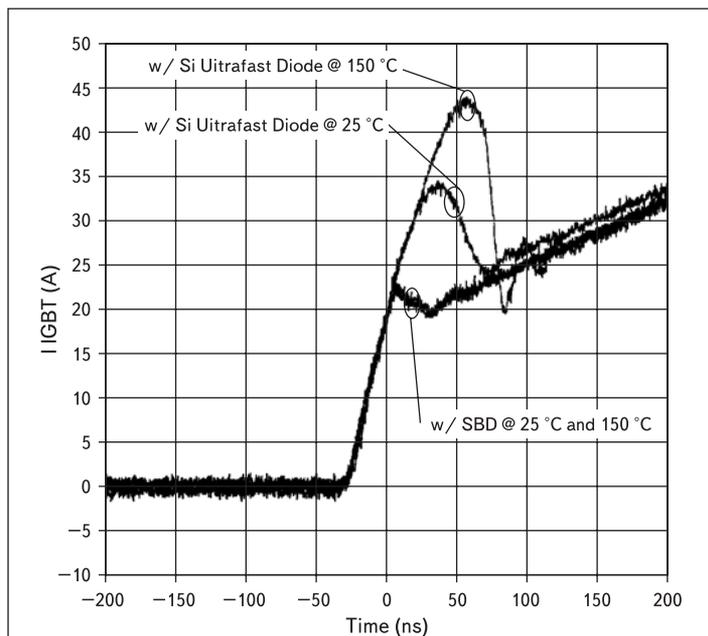


Рис. 8. Осциллограммы тока при включении IGBT совместно с кремниевым Ultra Fast диодом и карбид-кремниевым диодом Шоттки

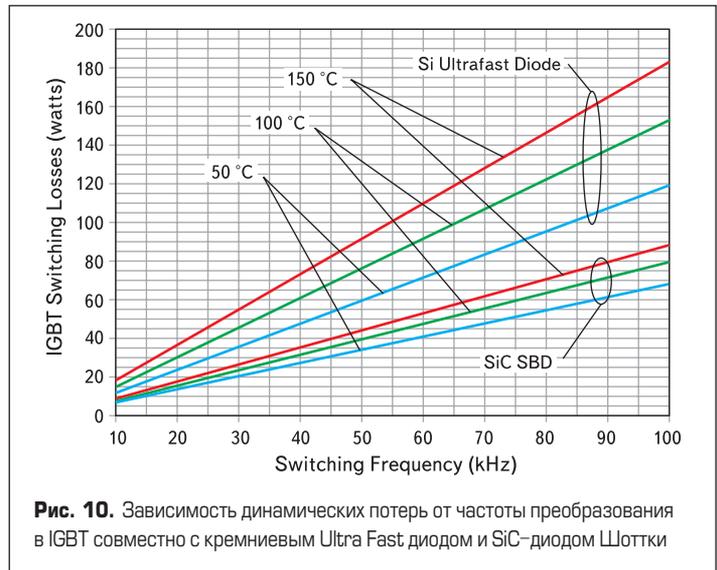
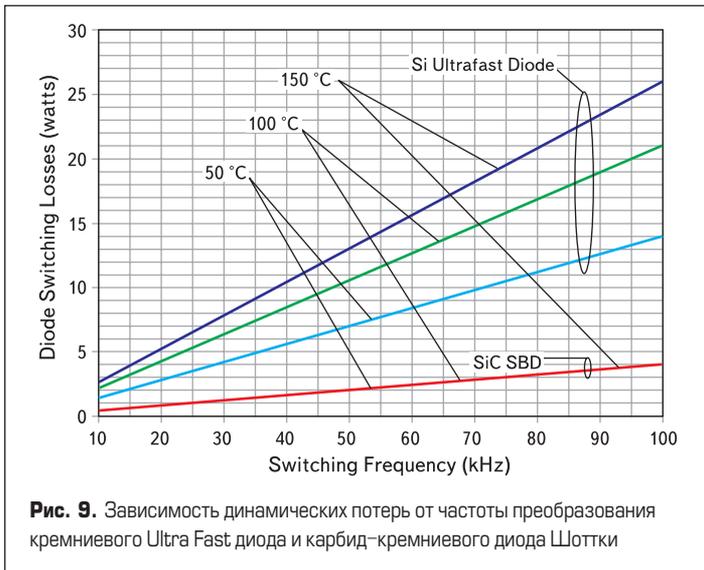


Рис. 9. Зависимость динамических потерь от частоты преобразования кремниевого Ultra Fast диода и карбид-кремниевого диода Шоттки

Рис. 10. Зависимость динамических потерь от частоты преобразования в IGBT совместно с кремниевым Ultra Fast диодом и SiC-диодом Шоттки

Таблица 2. Сравнительные параметры переключения 600 В IGBT при использовании Si Ultra Fast диода и SiC-диода Шоттки. Tj = 25 °C, Ik = 20 А, Uпит = 500 В, Rg = 10 Ом

Параметр	Обозначение	Si-диод	SiC-диод	Выигрыш, %
Пиковый обратный ток	Ipr, А	13	4	69
Время обратного восстановления	Trr, нс	83	30	64
Заряд обратного восстановления	Qrr, нКл	560	78	86
Потери выключения диода	Eoff_d, мДж	0,11	0,02	82
Потери включения диода	Eon_d, мДж	0,03	0,02	33
Полные потери в диоде	Ets_d, мДж	0,14	0,04	71
Потери включения IGBT	Eon_IGBT, мДж	0,63	0,23	63
Потери выключения IGBT	Eoff_IGBT, мДж	0,46	0,32	30
Полные потери в IGBT	Ets_IGBT, мДж	1,09	0,55	50
Полные потери	Ets, мДж	1,23	0,59	52

Таблица 3. Сравнительные параметры переключения 600 В IGBT при использовании Si Ultra Fast диода и SiC-диода Шоттки. Tj = 150 °C, Ik = 20 А, Uпит = 500 В, Rg = 10 Ом

Параметр	Обозначение	Si-диод	SiC-диод	Выигрыш, %
Пиковый обратный ток	Ipr, А	23	4	83
Время обратного восстановления	Trr, нс	100	33	67
Заряд обратного восстановления	Qrr, нКл	1220	82	93
Потери выключения диода	Eoff_d, мДж	0,23	0,02	91
Потери включения диода	Eon_d, мДж	0,03	0,02	33
Полные потери в диоде	Ets_d, мДж	0,26	0,04	85
Потери включения IGBT	Eon_IGBT, мДж	0,94	0,24	74
Потери выключения IGBT	Eoff_IGBT, мДж	0,89	0,64	28
Полные потери в IGBT	Ets_IGBT, мДж	1,83	0,88	52
Полные потери	Ets, мДж	2,09	0,92	56

при различных температурах переходов. Как следует из рис. 7, пиковый обратный ток SiC-диода не превышает 5 А и не зависит от температуры, в то время как ток обратного вос-

становления кремниевого диода растет с 13 А при 25 °C до 23 А при 150 °C. Аналогичная ситуация наблюдается и с пиковым током при включении IGBT, поскольку ток обратного

Таблица 4. Сравнительные параметры переключения 1200В IGBT при использовании Si Ultra Fast диода и SiC-диода Шоттки. Tj = 25 °C, Ik = 5 А, Uпит = 1000 В, Rg = 22 Ом

Параметр	Обозначение	Si-диод	SiC-диод	Выигрыш, %
Пиковый обратный ток	Ipr, А	5,5	1	82
Время обратного восстановления	Trr, нс	100	30	70
Заряд обратного восстановления	Qrr, нКл	295	20	93
Потери выключения диода	Eoff_d, мДж	0,08	0,02	75
Потери включения диода	Eon_d, мДж	0,03	0,02	33
Полные потери в диоде	Ets_d, мДж	0,11	0,04	64
Потери включения IGBT	Eon_IGBT, мДж	0,73	0,28	62
Потери выключения IGBT	Eoff_IGBT, мДж	0,33	0,25	24
Полные потери в IGBT	Ets_IGBT, мДж	1,06	0,53	50
Полные потери	Ets, мДж	1,17	0,57	51

восстановления диода вносит значительный вклад в его общий ток.

Зависимости полных динамических потерь от частоты преобразования при температурах 50, 100 и 150 °C с использованием кремниевого Ultra Fast и карбид-кремниевого диодов показаны на рис. 9 и 10. Потери в SiC-диоде Шоттки не только не зависят от температуры, но и по абсолютному значению оказываются намного ниже, чем у кремниевого аналога. Потери в паре «IGBT + SiC-диод» имеют значительно меньший температурный коэффициент, что обусловлено отсутствием температурной зависимости вклада обратного тока SiC-диода в общий ток транзистора.

### Результаты измерений потерь в IGBT с напряжением 1200 В

Измерения динамических характеристик на классификационном напряжении 1200 В проводились при использовании кремниевого Ultra Fast диода 8 А, 1200 В с мягким восстановлением (аналогичного интегральному диоду в общем корпусе с кристаллом IGBT с током коллектора 11 А) и карбид-кремниевого диода Шоттки 5 А, 1200 В типа CSD05120. Потери измерялись при напряжении питания 1000 В и токе коллектора 5 А. Осциллограммы токов и напряжений при переключении во многом аналогичны предыдущему случаю, поэтому приводить их не имеет смысла.

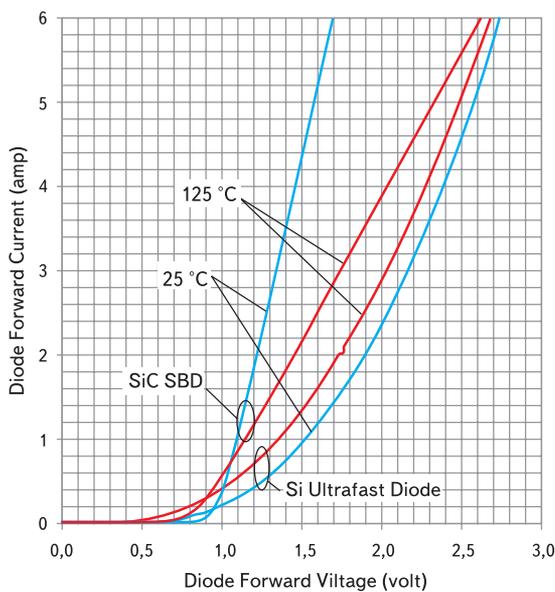
Сравнительные результаты измерений параметров переключения приведены в таблицах 4 и 5 для температур переходов 25 и 125 °C соответственно. Как и в предыдущем случае, полные динамические потери в системе «IGBT + диод» удается снизить более чем на 50% при температуре переходов 25 °C и почти на 60% — при 125 °C.

### Статические и суммарные потери

Бытует мнение, что SiC-диоды Шоттки якобы имеют несколько большие потери проводимости при высоких температурах кристалла, чем кремниевые приборы. Однако при корректном сравнении приборов из одной токовой группы, работающих в одинаковых условиях, получается обратный результат. Для иллюст-

**Таблица 5.** Сравнительные параметры переключения 1200 В IGBT при использовании Si Ultra Fast диода и SiC-диода Шоттки.  $T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $I_k = 5\text{ A}$ ,  $U_{пит} = 1000\text{ В}$ ,  $R_g = 22\text{ }\Omega$

Параметр	Обозначение	Si-диод	SiC-диод	Выигрыш, %
Пиковый обратный ток	$I_{pr}$ , А	6	1	83
Время обратного восстановления	$T_{rr}$ , нс	148	30	80
Заряд обратного восстановления	$Q_{rr}$ , нКл	540	20	96
Потери выключения диода	$E_{off\_d}$ , мДж	0,16	0,02	88
Потери включения диода	$E_{on\_d}$ , мДж	0,03	0,02	33
Полные потери в диоде	$E_{ts\_d}$ , мДж	0,19	0,04	79
Потери включения IGBT	$E_{on\_IGBT}$ , мДж	0,98	0,28	71
Потери выключения IGBT	$E_{off\_IGBT}$ , мДж	0,57	0,41	28
Полные потери в IGBT	$E_{ts\_IGBT}$ , мДж	1,55	0,69	55
Полные потери	$E_{ts}$ , мДж	1,74	0,73	58



**Рис. 11.** ВАХ Si Ultra Fast диода и SiC диода Шоттки

**Таблица 6.** Сравнительные данные суммарных потерь в инверторе с 1200 В IGBT при использовании Si Ultra Fast диода и SiC-диода Шоттки.  $T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $I_k = 5\text{ A}$ ,  $U_{пит} = 1000\text{ В}$ ,  $R_g = 22\text{ }\Omega$

Параметр	Ед. измерения	Si-диод	SiC-диод	Выигрыш, %
Потери диода динамические	Вт	19	4	79
Потери диода статические	Вт	12,5	11,7	6
Полные потери в диоде	Вт	31,5	15,7	50
Потери IGBT динамические	Вт	155	69	55
Потери IGBT статические	Вт	14,5	14,5	0
Полные потери в IGBT	Вт	169,5	83,5	51
Суммарные потери	Вт	201	99,2	51

рации этого утверждения на рис. 11 приведены прямые ветви ВАХ диодов, используемых при измерениях в предыдущем разделе. При токе 5 А SiC-диод Шоттки имеет на 0,75 В при 25 °С и на 0,18 В при 125 °С меньшее прямое падение напряжения, чем кремниевый Ultra Fast диод. В результате имеет место определенный выигрыш и по статическим потерям при использовании карбид-кремниевого диода. В заключение приведем результаты измерений суммарных потерь в преобразователе, работающем на частоте 100 кГц. В инверторе применены IGBT с напряжением 1200 В, работающие при среднем токе 2,5 А (5 А в состоянии проводимости, скважность 2). Температура перехода 125 °С, прямое падение на IGBT составляет 2,9 В при токе 5 А. Результаты для пар «IGBT + SiC-диод» и «IGBT + Ultra Fast Si-диод» приведены в таблице 6. Как следует

из таблицы, использование в качестве антипараллельного SiC-диода Шоттки позволило снизить суммарные потери более чем вдвое.

**Заключение**

Мы рассмотрели одно из наиболее эффективных применений карбид-кремниевых диодов Шоттки. Полученные результаты говорят сами за себя. Именно за счет возможности радикального снижения потерь и, как следствие, снижения тепловой нагрузки и увеличения надежности многие производители силовых полупроводниковых приборов обращают пристальное внимание на возможность совместного корпусирования кристаллов Si IGBT и SiC-диодов. В настоящее время коммерчески доступные изделия «IGBT + SiC-диод» в конфигурациях одиночных приборов, полу-



**Рис. 12.** 3-фазный DC/AC-инвертор, собранный полностью с применением силовых карбид-кремниевых полупроводниковых приборов (Cree — Kansai Electric)

мостов и однофазных мостов выпускает компания АРТ, корпусирующая кристаллы Cree. Однако и среди российских производителей IGBT-модулей ряд компаний проявляет интерес к подобным приборам. Пока массовое внедрение таких структур тормозится недостаточно большими токами серийных кристаллов карбид-кремниевых диодов Шоттки — 10 А при напряжении 1200 В и 20 А при напряжении 600 В. Хотя благодаря положительному температурному коэффициенту прямого падения напряжения кристаллы SiC-диодов можно включать параллельно без дополнительных выравнивающих компонентов, обеспечивая требуемый прямой ток, такое решение не всегда является экономически приемлемым.

Ситуация может измениться уже в ближайшее время, поскольку компания Cree обещает в конце 2006 года сделать коммерчески доступными карбид-кремниевые диоды Шоттки 600 В, 100 А и 1200 В, 50 А. Кроме того, анонсировано начало производства карбид-кремниевых MOSFET, управляемых тиристором и высоковольтных p-i-n-диодов.

Преимущества полупроводниковых приборов на основе SiC для силовой электроники ярко иллюстрирует недавний совместный проект Cree и Kansai Electric (KEPCO). Ими был разработан и испытан 3-фазный DC/AC-инвертор, собранный полностью с применением силовых карбид-кремниевых полупроводниковых приборов. Инвертор мощностью 110 кВт разместили в объеме традиционного устройства мощностью 12 кВт (рис. 12). В качестве ключевых приборов в нем используются карбид-кремниевые управляемые тиристоры. Инвертор предназначен для преобразования частоты в генераторах ветряных и солнечных электростанций, а также в резервных источниках питания большой мощности.

**Литература**

1. Полищук А. Проблемы выбора ключевых транзисторов для преобразователей с жестким переключением // Силовая электроника. 2004. № 2.
2. Полищук А. Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния — настоящее и будущее силовой электроники // Компоненты и технологии. 2004. № 8.
3. Jim Richmond. Hard Switched Silicon IGBT's? Cut Switching Losses in Half with Silicon Carbide Schottky Diodes. Cree, Inc. Power Products. 2005.