

# Исследования параметров и характеристик SiC-диодов Шоттки

в гибридных IGBT-модулях  
ОАО «Электровыпрямитель»

**Представлены результаты исследований параметров и характеристик карбидокремниевых диодов Шоттки на напряжение 1200 В, используемых в гибридных IGBT-модулях в качестве оппозитных диодов (freewheeling diode — FWD), а также в линейке высокочастотных SiC-диодных модулей.**

**Алексей Бормотов  
Татьяна Шапетько  
Михаил Тогаев  
Вячеслав Мускатиньев**

nicpp@elvpr.ru

## Введение

Расширение областей применения приборов силовой электроники и возрастающие требования к их эксплуатационным характеристикам привели к появлению новых широкозонных полупроводниковых материалов, в первую очередь карбида кремния. Новые полупроводниковые приборы на основе SiC позволяют:

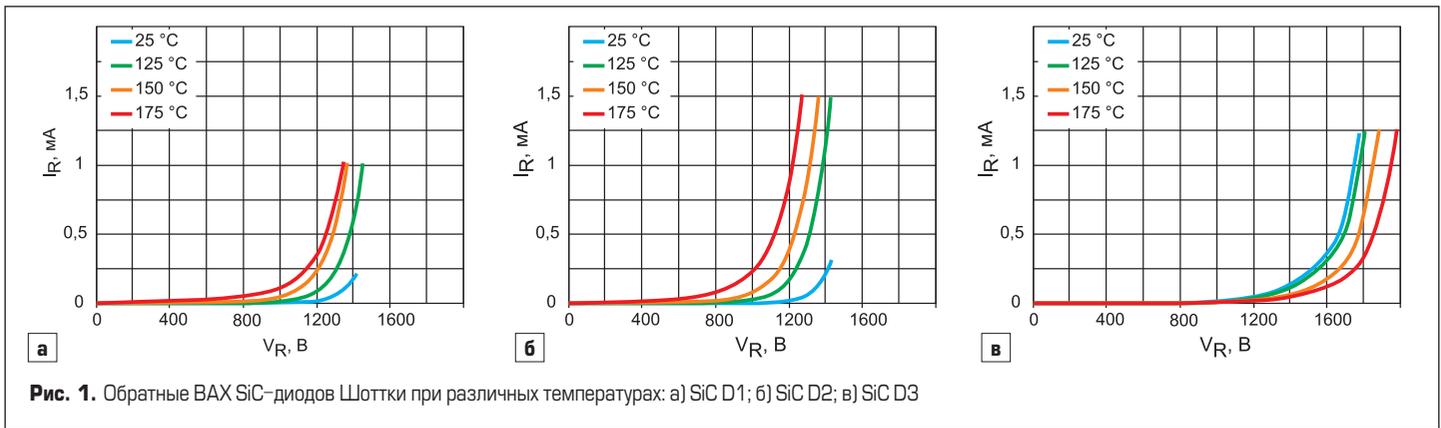
- расширить диапазон рабочих частот;
- увеличить диапазон эксплуатационных температур;
- снизить статические и динамические потери;
- повысить стойкость к аварийным режимам работы;
- увеличить надежность и срок службы изделий;
- снизить массу оборудования.

Широкому распространению карбидокремниевых полупроводниковых приборов в силовой электронике по-прежнему препятствует их высокая цена. Однако стоит отметить, что некоторые задачи можно успешно решить с помощью комбинированных схем, в которые входят как SiC-компоненты, так и традиционные кремниевые приборы. К ним относится разработка источников питания и преобразователей на основе ШИМ, имеющих частоты коммутации около 50 кГц. Для этих устройств ОАО «Электровыпрямитель» производит серию гибридных IGBT-модулей на ток до 300 А и напряжение до 1200 В. В данных модулях применяют кремниевые кристаллы IGBT и карбидокремниевые диоды Шоттки в качестве диодов обратного тока.

Диоды Шоттки имеют практически нулевой заряд обратного восстановления, что существенно снижает энергию потерь как при обратном восстановлении диода, так и при включении IGBT, на ток включения которого накладывается импульс тока обратного восстановления диода. Кроме того, при использовании оппозитных диодов с *p-n*-переходом скорость включения IGBT не должна превышать определенное значение, поскольку при этом в диоде начинает проявляться так называемый эффект «схлопывания» заряда обратного восстановления и возникают колебания тока. Эти колебания приводят не только к дополнительным потерям мощности, но и порой к выходу из строя как диода, так и IGBT. Чтобы предотвратить развитие подобных процессов, скорость включения IGBT регулируется резистором в цепи затвора  $R_{Gon}$ . Если IGBT-модуль использован вместе с SiC-диодами Шоттки, то он может коммутировать ток с максимально допустимым  $di/dt$ , т. е. с сопротивлением затворного резистора  $R_{Gon}$  близким к нулю [1].

При выключении транзистора влияние диодов минимально, а перенапряжения, возникающие при быстром спаде тока коллектора, обусловлены только свойствами самого транзистора [2].

Разработчикам и производителям FRD приходится постоянно решать задачи оптимизации характеристик оппозитных диодов, чтобы потребитель мог максимально использовать возможности IGBT. Применение SiC-диодов Шоттки в качестве оппозитных для IGBT



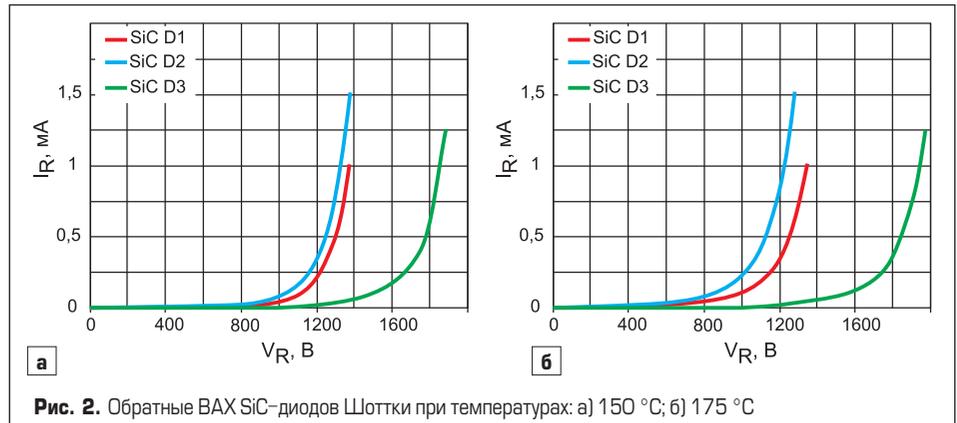
в гибридных модулях позволяет кардинально разрешить все сложные проблемы.

ОАО «Электровыпрямитель» изготавливает силовые гибридные IGBT-модули для различного применения в двух широко распространенных корпусах размерами 34×94 и 62×106 мм. В процессе производства используются чипы SiC-диодов Шоттки нескольких известных производителей. Главный критерий при выборе SiC-диодов для комплектации гибридных IGBT-модулей — достижение оптимального соотношения между совокупностью частотных свойств IGBT и SiC-диода и режимами эксплуатации оборудования заказчика.

Ниже приведены результаты исследования параметров и характеристик трех типов SiC-диодов Шоттки на напряжение 1200 В, условно обозначенных как SiC D1, SiC D2, SiC D3, которые выпущены различными производителями.

### Статические параметры

Для измерения статических и динамических характеристик исследуемые SiC-диоды собирали в гибридные модули по схеме полумоста и чоппера в корпусе 34×94 мм (M13). Измерения статических параметров SiC-диодов были проведены на измерителе характеристик полупроводниковых приборов ПКТУ-1 собственного производства и на ком-



плексе фирмы LEM для измерения статических параметров.

На рис. 1 изображены обратные ВАХ SiC D1, SiC D2, SiC D3 при температурах 25, 125, 150 и 175 °С. Видно, что обратное напряжение  $V_R$  при температуре 25 °С у диодов SiC D1 и SiC D2 примерно одинаковое, оно находится в диапазоне 1395–1420 В, а у SiC D3 обратное напряжение составляет 1470 В, что на 5% выше. Обратное напряжение у диодов SiC D1 и SiC D2 с ростом температуры структуры уменьшается, а у SiC D3 — увеличивается.

На рис. 2 представлены обратные вольт-амперные характеристики SiC D1, SiC D2, SiC D3 при температурах 150 и 175 °С.

На рис. 2 видно, что SiC D3 имеет ярко выраженный положительный температурный коэффициент напряжения пробоя,

тогда как у SiC D1 и SiC D2 он отрицательный. Значения  $\Delta V_{BR}/\Delta T_j$  для диодов SiC D1, SiC D2 и SiC D3 равны -0,39; -0,6 и +2,92 В/°С соответственно.

На рис. 3 представлены прямые вольт-амперные характеристики SiC-диодов при  $T_j = 25, 125, 150, 175$  °С.

Из рис. 3 следует, что инверсия (изменение знака температурной зависимости  $V_F$  с отрицательного на положительный) у диодов SiC D1 и SiC D2 происходит при прямом токе 10 А, а у SiC D3 — при 8 А при номинальном токе диода 50 А. Следовательно, для параллельного соединения в многокристалльных модулях допустимо использовать диоды всех трех изготовителей. В таблице 1 приведены усредненные значения статических параметров диодов всех трех типов.

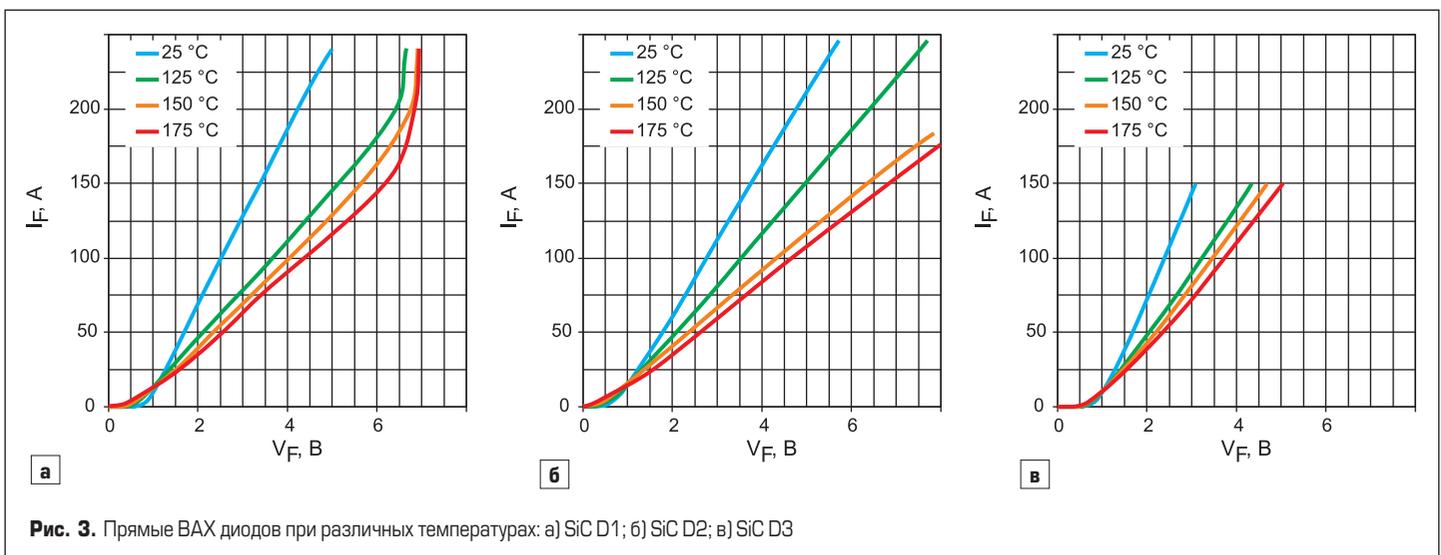


Таблица 1. Результаты измерений статических параметров

Диод	Параметры и режимы измерений							
	$V_{BR}$ , В		$I_R$ , мА		$\Delta V_{BR}/\Delta T_j$ , В/°С	$V_F$ , В		$I_{inv}$ , А
	25 °С, $I_R = 0,2$ мА	150 °С, $I_R = 1,0$ мА	25 °С, $V_R = 1200$ В	150 °С, $V_R = 1200$ В		25 °С, $I_F = 50$ А	150 °С, $I_F = 50$ А	
SiC D1	1410	1362	0,03	0,24	-0,39	1,7	2,33	10
SiC D2	1395	1319	0,05	0,39	-0,6	1,7	2,40	10
SiC D3	1470	1835	0,03	0,025	+2,92	1,6	2,15	8

**Динамические параметры**

Как было отмечено выше, скорости изменения тока при включении и выключении IGBT и параметры обратного восстановления FWD являются важнейшими факторами, влияющими на выбор диода обратного тока. Его динамические характеристики, очень сильно связанные с процессом включения IGBT, определяют коммутационные потери при включении транзистора.

Скорость включения и энергия потерь при включении  $E_{on}$  IGBT определяются значением сопротивления  $R_G$  в цепи затвора транзистора. Следовательно, этим резистором регулируются и скорость изменения тока  $di_F/dt$ , и характеристики обратного восстановления оппозитного SiC-диода.

Исследования динамических параметров диодов проведены стандартным методом с помощью полумостовой испытательной схемы, изображенной на рис. 4.

На рис. 5–7 представлены зависимости динамических параметров диодов SiC D1, SiC D2 и SiC D3 от скорости спада тока  $di_F/dt$  при обратном восстановлении. Был применен следующий режим измерений:  $V_{CC} = 600$  В,  $I_C = 50$  А,  $T_j = 125^\circ\text{C}$ .

На рис. 5 показаны зависимости максимального тока обратного восстановления диодов SiC D1, SiC D2 и SiC D3 от скорости спада тока  $di_F/dt$ .

Из графиков на рис. 5 следует, что у всех диодов с ростом  $di_F/dt$  растет  $I_{RM}$ . У диода SiC D3 самые высокие значения токов обратного восстановления, а также сильная зависимость  $I_{RM}$  от  $di_F/dt$ . У диодов SiC D1 и SiC D2 токи  $I_{RM}$  меньше, чем у SiC D3, в 2 раза (при 1500 А/мкс) и наблюдается плавное увеличение  $I_{RM}$  во всем диапазоне скоростей коммутации. Самые низкие значения  $I_{RM}$  во всем исследуемом диапазоне  $di_F/dt$  у оппозитного диода SiC D1.

На рис. 6 представлены зависимости времени переключения оппозитных диодов  $t_c$  от скорости коммутации  $di_F/dt$ .

Прежде всего, следует отметить, что у SiC D1 и SiC D2 время переключения  $t_c$  практически не зависит от  $di_F/dt$ . У SiC D3  $t_c$  заметно уменьшается с ростом  $di_F/dt$ . Самые низкие времена переключения  $t_c = 19$  нс — у диодов SiC D2, самые высокие  $t_c = 55$  нс — у диодов SiC D3.

На рис. 7 приведены зависимости емкостного заряда  $Q_c$  диодов SiC D1, SiC D2 и SiC D3 от скорости изменения тока  $di_F/dt$ .

У диода SiC D3 наблюдается сильная зависимость  $Q_{rr}$  от  $di_F/dt$ . Следует отметить, что у диодов SiC D1 и SiC D2 емкостной заряд  $Q_c$  с ростом  $di_F/dt$  увеличивается незначительно, т. е. практически не зависит от скорости изменения тока диодов. У диода SiC D3 величина  $Q_{rr}$  при  $di_F/dt = 1250$  А/мкс почти в 4 раза больше, чем у диодов SiC D1 и SiC D2. Разница в значениях  $Q_c$  у диодов SiC D1

и SiC D2 незначительная. Но все же более низкое значение  $Q_c$  от  $di_F/dt$  дает диоду SiC D2 преимущества перед диодами других типов при работе прибора на высоких скоростях коммутации, что обеспечивает IGBT более низкие динамические потери на повышенных частотах.

Чтобы объективно сравнить статические и динамические параметры карбидокремниевых диодов SiC D1, SiC D2 и SiC D3, а также выбрать наиболее подходящий из них для применения в качестве оппозитного диода в гибридных IGBT-модулях, был выполнен формализованный расчет баллов на основе полученных результатов для каждого из измеренных параметров. Лучший диод по каждому из параметров был обозначен «+++», средний — «++», а худший — «+».

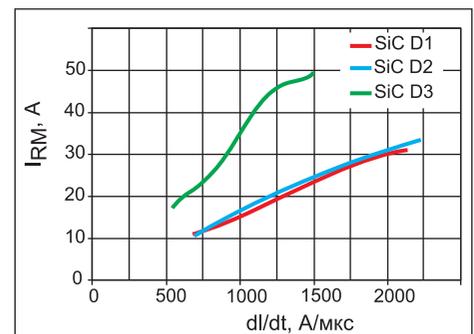


Рис. 5. Зависимость максимального тока обратного восстановления  $I_{RM}$  в оппозитных диодах от скорости коммутации  $di_F/dt$

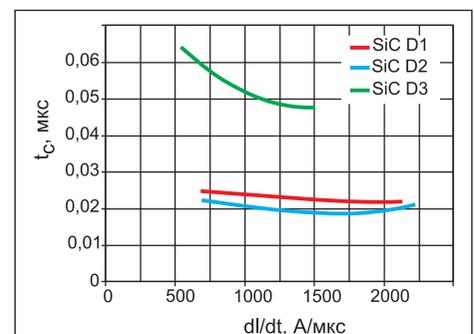


Рис. 6. Зависимость времени переключения оппозитных диодов  $t_c$  от скорости коммутации  $di_F/dt$

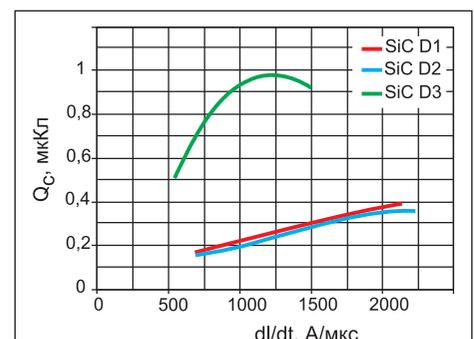


Рис. 7. Зависимость емкостного заряда  $Q_c$  от скорости коммутации  $di_F/dt$

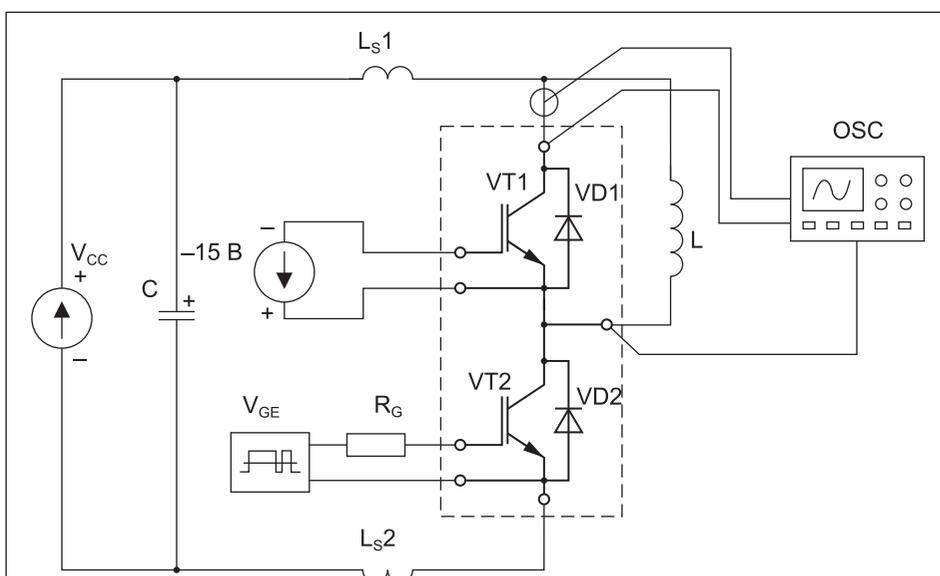


Рис. 4. Схема для измерения динамических параметров оппозитного диода VD1

**Таблица 2.** Оценка результатов измерений статических и динамических параметров диодов SiC D1, SiC D2 и SiC D3

Тип диода	Оценка параметра							
	Статика			Динамика			Сумма $\Sigma$	
	$V_F$	$I_{inv}$	$\Delta V_{BR}/\Delta T_j$	$I_{RM}$	$t_c$	$Q_c$	Статические + динамические	Динамические
SiC D1	++	++	+++	+++	++	+++	15	8
SiC D2	+	++	+++	++	+++	+++	14	8
SiC D3	+++	+++	+	+	+	+	10	3

Итоговая оценка результатов измерений по трехбалльной шкале представлена в таблице 2.

Приведенная в таблице 2 оценка результатов исследований трех типов карбидокремниевых диодов Шоттки показала, что лучшим по суммарному показателю «статика + динамика» является диод SiC D1. Ему немного уступает (из-за статки) диод SiC D2. По динамическим параметрам диоды SiC D1 и SiC D2 равны. Диод SiC D3 — аутсайдер по всем динамическим параметрам, однако лидер по статике.

**Осцилляции при высоких скоростях переключения**

Важным моментом при эксплуатации IGBT-модулей является исключение высокочастотных осцилляций при коммутации. Осцилляции в IGBT-модулях [3] связаны как со свойствами структур FRD и IGBT, так и с паразитной индуктивностью схемы применения и самого IGBT-модуля. Осцилляций можно избежать, если применять FRD с мягким обратным восстановлением. Возможны и другие контрмеры против осцилляций при восстановлении FRD, например путем уменьшения паразитной индуктивности и максимальной симметрии расположения кристаллов FRD и IGBT в модуле. В гибридных IGBT-модулях вопрос симметричного расположения кристаллов SiC-диодов встает еще более актуально. Это связано с тем, что в настоящее время на рынке имеются коммерческие SiC-диоды Шоттки только на ток до 50 А,

и потому в гибридных IGBT-модулях с номинальным током в несколько сотен ампер необходимо соединять параллельно достаточно большое количество чипов диодов. Чем больше чипов соединено параллельно, тем сложнее добиться равномерного распределения тока, в первую очередь в динамике. Поэтому применение оппозитных SiC-диодов в гибридных модулях является в настоящее время целесообразным в диапазонах малой и средней мощности для номинальных токов до 500–600 А.

Осцилляции в гибридных модулях появляются не только из-за несимметрии конструкции модуля. Диоды Шоттки не имеют заряда обратного восстановления, который приводит к эффекту «схлопывания» и колебаниям тока в традиционных диодах с *p-n*-переходом. Но они имеют внутреннюю емкость, которая образует колебательные контуры с паразитными индуктивностями силовых выводов. Быстрая коммутация и приводит к высокочастотным колебаниям в этих контурах.

На рис. 8 представлены осциллограммы тока  $i_R(t)$  (голубой цвет) и напряжения  $v_R(t)$  (красный цвет) при обратном восстановлении оппозитных SiC-диодов, когда значения сопротивления резистора в цепи затвора IGBT одинаковы.

У всех SiC-диодов наблюдается небольшая осцилляция после завершения процесса обратного восстановления. У диода SiC D3 амплитуда колебаний значительно больше, чем у SiC D1 и SiC D2, что также подтверждает необходимость снижения скорости включения IGBT при совместной работе с SiC D3.

Следует отметить, что величина входного резистора снижена более чем в 5 раз по сравнению с той, что у аналогичного IGBT-модуля, в котором применен диод с *p-n*-переходом. Тем самым подтверждена возможность эксплуатации гибридных IGBT-модулей с малым  $R_G$ , что дополнительно снижает коммутационные потери.

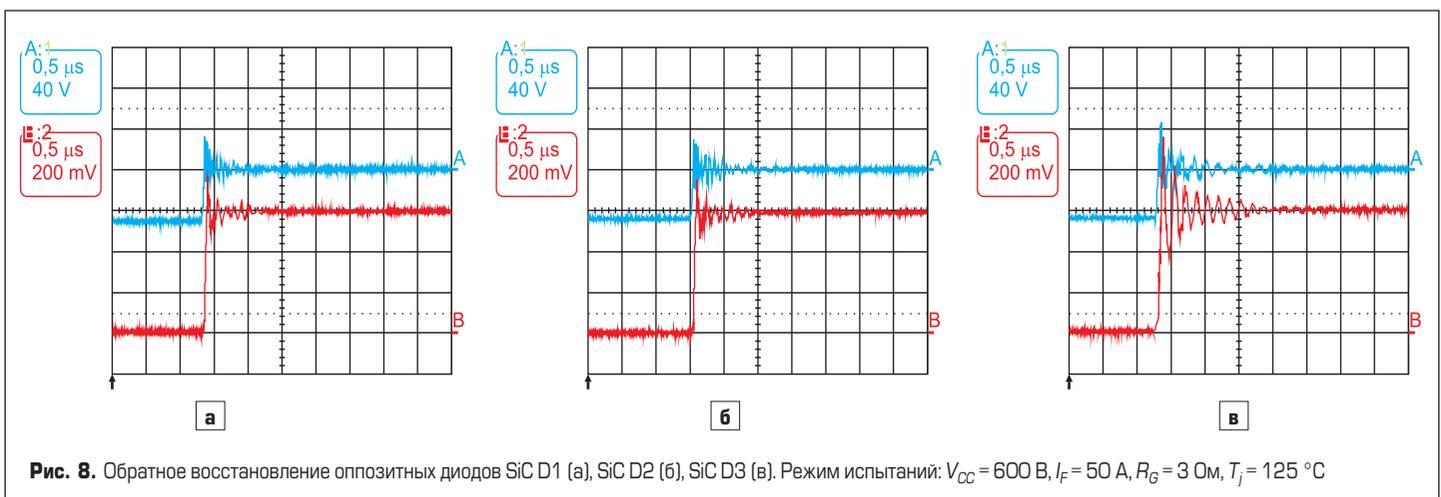
**Заключение**

Из трех исследованных карбидокремниевых диодов Шоттки, изготовленных различными производителями, диоды SiC D1 и SiC D2 наиболее подходят для работы в качестве оппозитных диодов в гибридных IGBT-модулях. Они имеют низкие статические потери и отличные динамические характеристики: низкие значения  $I_{RM}$ ,  $Q_c$ ,  $t_c$  и минимальные осцилляции при высоких скоростях спада тока ( $di_F/dt \geq 2000$  А/мкс), что дает возможность эффективно их применять в ключевых схемах не только с частотными IGBT, но и с силовыми MOSFET-транзисторами на частотах коммутации до 100 кГц.

Диоды SiC D3 имеют худшие динамические характеристики, но лучше по статике: низкое значение импульсного прямого напряжения  $V_F$  и тока утечки  $I_R$ , более высокое обратное напряжение  $V_R$ . Поэтому их применение может быть обоснованным в более высоковольтных модулях, но на более низких частотах и скоростях коммутации IGBT, а также в частотных диодных модулях.

**Литература**

1. Volke A., Hornkamp M. IGBT Modules. Technologies, Driver and Application, 2010.
2. Мартыненко В. А., Мускатиньев В. Г. и др. Исследования диодов с быстрым восстановлением в ключевых схемах IGBT-модулей на напряжение 1200 В // Силовая электроника. 2013. № 5.
3. Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., De Doncker R. Semiconductor Power Devices. Physics, Characteristics, Reliability. Springer, 2011.



**Рис. 8.** Обратное восстановление оппозитных диодов SiC D1 (а), SiC D2 (б), SiC D3 (в). Режим испытаний:  $V_{CC} = 600$  В,  $I_F = 50$  А,  $R_G = 3$  Ом,  $T_j = 125$  °С