

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:

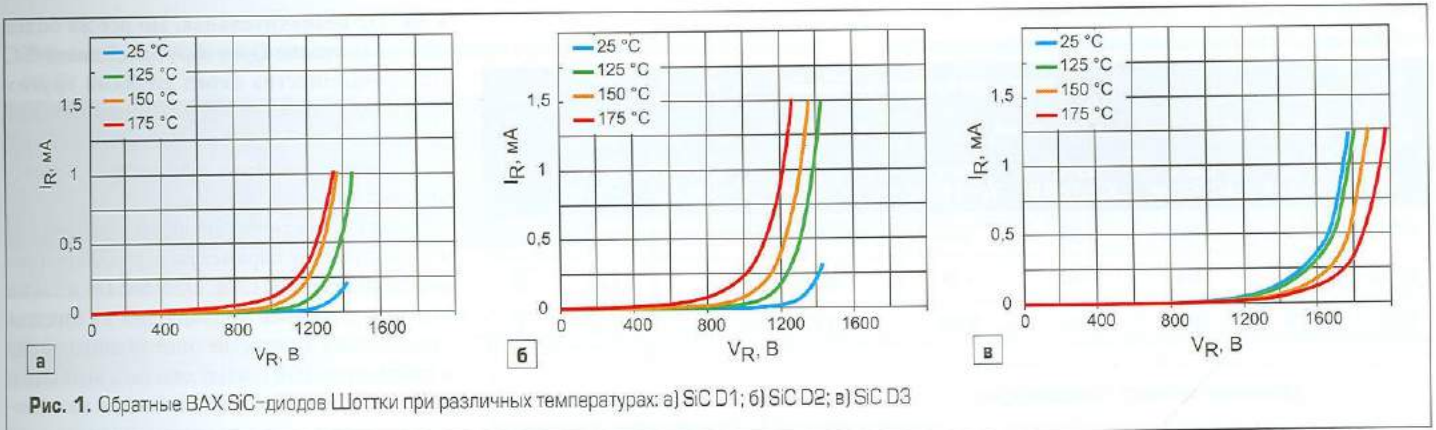
- расширить диапазон рабочих частот;
- увеличить диапазон эксплуатационных температур;
- снизить статические и динамические потери;
- повысить стойкость к аварийным режимам работы;
- увеличить надежность и срок службы изделий;
- снизить массу оборудования.

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



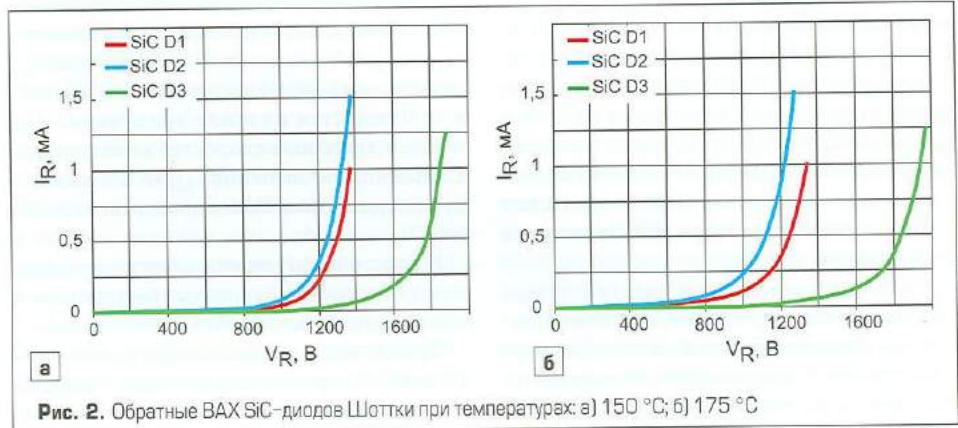
в гибридных модулях позволяет кардинально разрешить все сложные проблемы.

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 исследований 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.

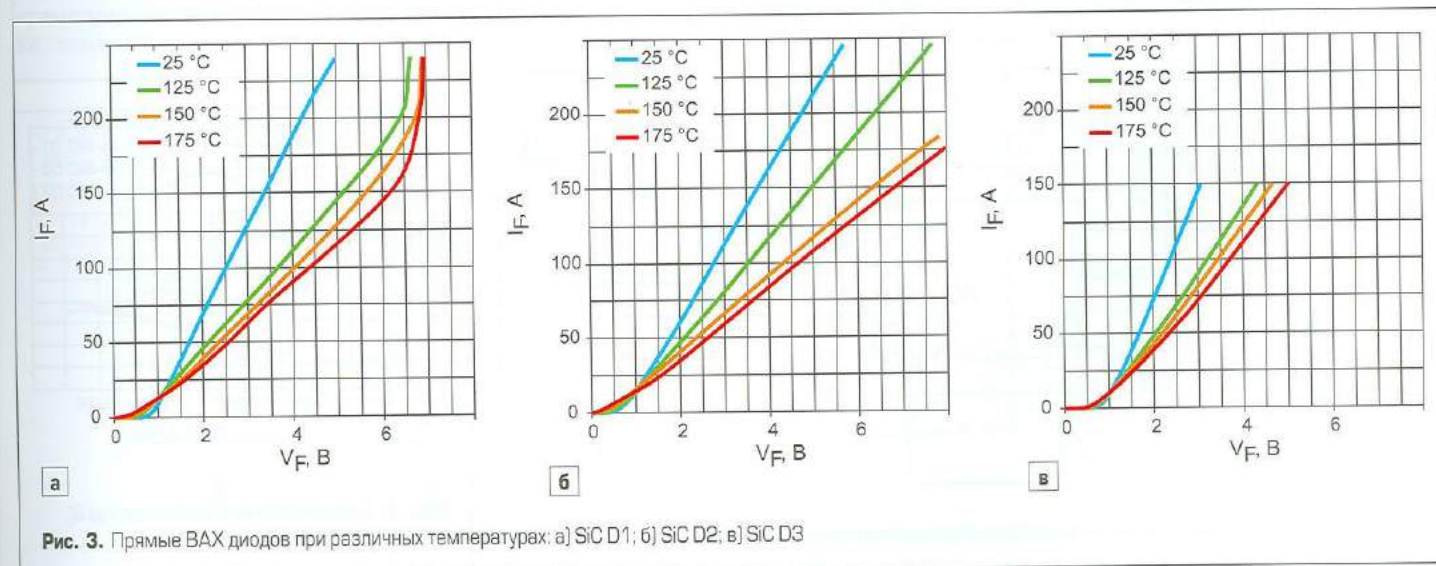


Таблица 1. Результаты измерений статических параметров

Диод	Параметры и режимы измерений							
	V_{BR} , В		I_R , мА		$\Delta V_{BR}/\Delta T_p$, В/°С	V_{FR} , В		I_{Tavg} , 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 .

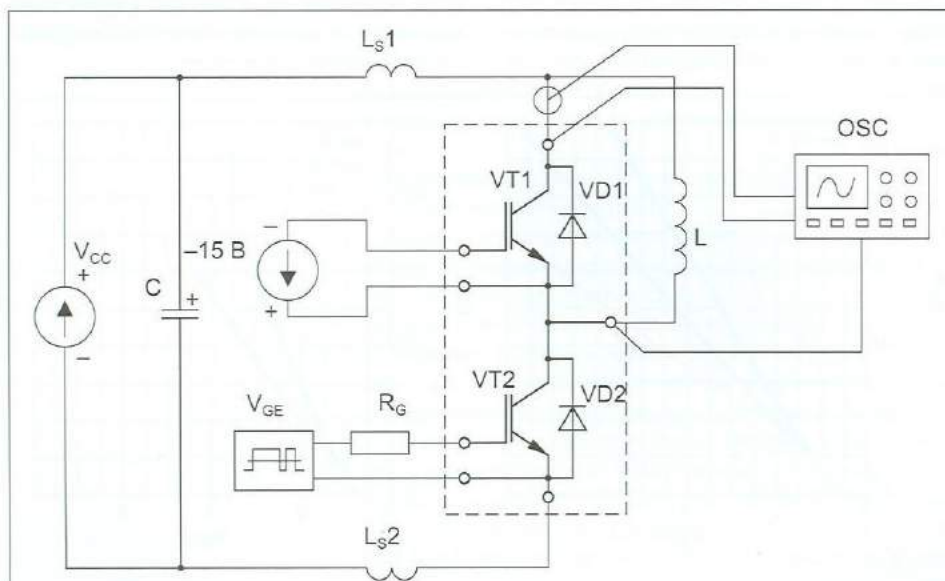


Рис. 4. Схема для измерения динамических параметров оппозитного диода VD1

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_c 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_c 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 — «+».

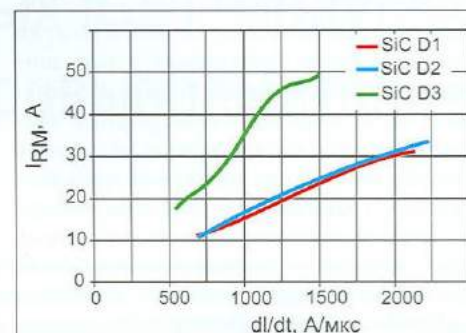


Рис. 5. Зависимость максимального тока обратного восстановления I_{RM} в оппозитных диодах от скорости коммутации di_F/dt

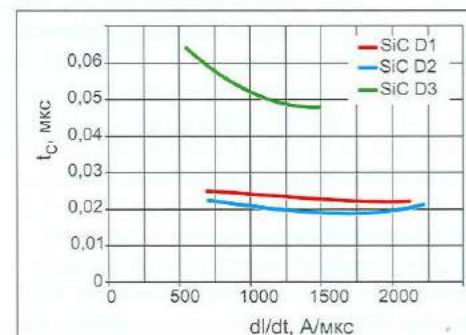


Рис. 6. Зависимость времени переключения оппозитных диодов t_c от скорости коммутации di_F/dt

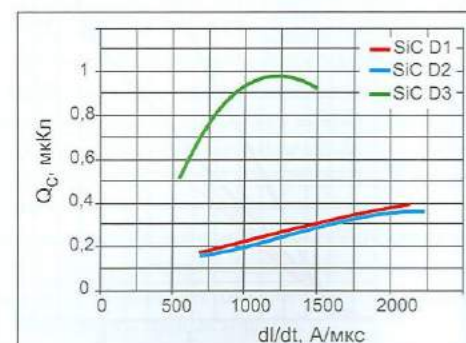


Рис. 7. Зависимость емкостного заряда Q_c от скорости коммутации di_F/dt

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

Тип диода	Оценка параметра							
	Статика			Динамика			Сумма Σ	
	V_F	I_{inv}	$\Delta V_{BR}/\Delta T_1$	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 карбидкремниевых диодов Шоттки показала, что лучшим по суммарному показателю «статика + динамика» является диод SiC D1. Ему немного уступает (из-за статики) 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 карбидкремниевых 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 ($di_p/dt \geq 2000$ 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.

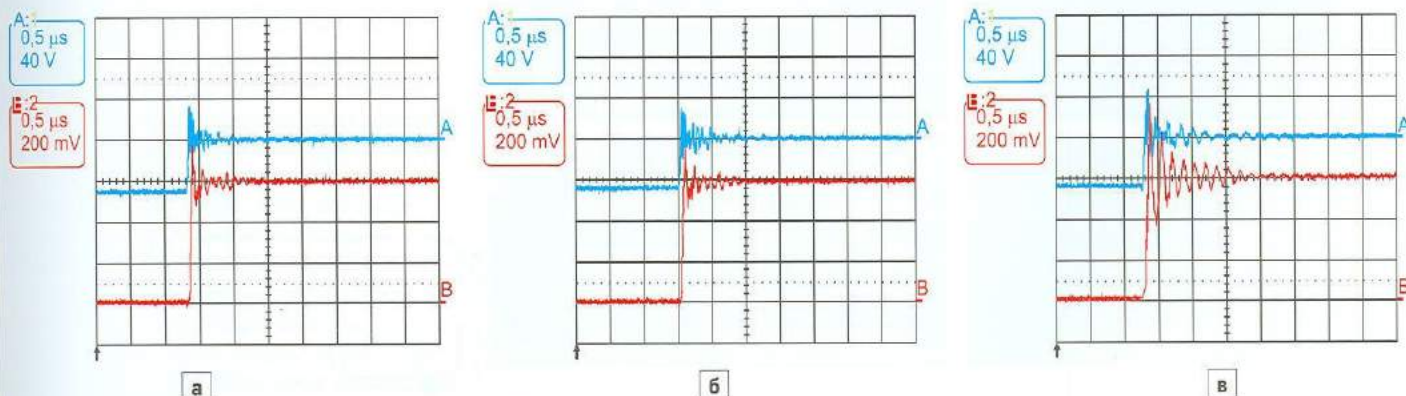


Рис. 8. Обратное восстановление оппозитных диодов SiC D1 (а), SiC D2 (б), SiC D3 (в). Режим испытаний: $V_{CC} = 600$ В, $I_F = 50$ А, $R_G = 3$ Ом, $T_J = 125$ °С