

# Исследования диодов

## с быстрым восстановлением в ключевых схемах IGBT-модулей на напряжение 1200 В

**В статье представлены результаты исследований параметров и характеристик быстровосстанавливающихся диодов (FRD) на напряжение 1200 В, используемых в IGBT-модулях в качестве защитных оппозитных диодов (freewheeling diode — FWD) при работе на индуктивную нагрузку. Измерения проводились на образцах от трех производителей, отличающихся структурой полупроводникового кристалла и технологией изготовления.**

**Валентин Мартыненко  
Вячеслав Мускатиньев  
Алексей Бормотов  
Михаил Тогаев**

[martin@moris.ru](mailto:martin@moris.ru)

### Введение

Важными компонентами IGBT-модулей являются диоды с быстрым восстановлением, подключенные антипараллельно к каждому транзистору. От электрических параметров и характеристик этих диодов зависят практически все показатели эффективности IGBT-модулей при работе в различных схемах с применением ШИМ. Основное влияние характеристики диодов оказывают на статические и динамические потери, выделяемые в IGBT-модулях при коммутации тока, а также на способность модулей надежно функционировать в предельных частотных режимах без осцилляций и электромагнитных помех.

В IGBT-модулях при переключении всегда происходят перенапряжения, которые зависят как от паразитной индуктивности в цепи постоянного тока, так и от свойств диодов и транзисторов. Причем перенапряжения, появляющиеся в переходном процессе включения IGBT, зависят в основном от поведения антипараллельного диода в процессе обратного восстановления, тесно взаимосвязанного с характером включения транзистора. При выключении транзистора влияние диодов минимально, а перенапряжения, возникающие при быстром спаде тока коллектора, обусловлены только свойствами самого транзистора.

Обратное восстановление FRD также оказывает сильное влияние на область безопасной работы (FBSOA) и энергию потерь при включении IGBT. Связано это с тем, что включенный IGBT, кроме тока нагрузки, должен пропустить и импульс тока обратного восстановления длительностью, равной времени выключения оппозитного диода. Дополнительный ток и потери обратного восстановления диода ограничивают SOA и увеличивают потери при включении IGBT. Все это вынуждает разработчиков и производителей FRD постоянно

решать задачи по оптимизации характеристик оппозитных диодов, чтобы потребитель мог максимально использовать возможности IGBT.

Основные требования к FRD, используемым в IGBT-модулях, можно кратко сформулировать следующим образом: блокирующее напряжение диодов должно быть не менее напряжения пробоя транзисторов; прямой ток диода равен или больше постоянного тока транзистора; низкие время, заряд и ток обратного восстановления; мягкое восстановление при переходе из проводящего в блокирующее состояние.

ОАО «Электровыпрямитель» занимается изготовлением силовых полупроводниковых приборов средней и большой мощности, в том числе и IGBT-модулей для различных применений. В своем производстве предприятие использует кристаллы IGBT и FRD известных электронных компаний, как зарубежных, так и российских. Главным критерием при выборе быстровосстанавливающихся диодов для каждого IGBT-модуля является достижение оптимального баланса потерь путем тщательного согласования характеристик IGBT и диода. Появившиеся в России собственные кристаллы IGBT с высокими технико-экономическими показателями [1] требуют разработки и выбора согласованных с ними кристаллов FRD. В данной работе исследовались параметры и характеристики трех типов диодов, условно обозначенных как FRD1, FRD2 и FRD3, выполненных тремя различными производителями. В статье приведены результаты исследований этих диодов, даны сравнение характеристик и оценка возможности их применения в IGBT-модулях.

### Статические параметры диодов

Для измерения статических и динамических характеристик исследуемые диоды были собраны в диодно-транзисторные модули по схеме полумоста

в корпусе M3. Измерения статических параметров FRD проводились на измерителе характеристик полупроводниковых приборов Л2-56 и измерительном комплексе фирмы LEMSYS.

Тестирование показало, что напряжение лавинного пробоя  $V_{BR}$  при комнатной температуре у всех исследуемых типов диодов находится в диапазоне 1320–1470 В. Наиболее высоковольтными оказались диоды FRD3, которые по рабочему блокирующему напряжению ближе к значению 1400 В, чем к 1200. Пробивное напряжение диодов увеличивается с ростом температуры структуры. В качестве иллюстрации этой

зависимости на рис. 1 представлены блокирующие ВАХ диода FRD2 при температурах 25, 100, 125 и 150 °С.

В результате измерений определены температурные коэффициенты напряжения пробоя ( $\Delta V_{BR}/\Delta T_j$ ). Для диодов FRD1, FRD2 и FRD3 этот параметр соответственно равен примерно 1,6; 0,9 и 1,25 В/°С.

На рис. 2 представлены прямые вольт-амперные характеристики FRD при  $T_j = 25$  и 125 °С.

Из рис. 2 следует, что ток перехода с отрицательной температурной зависимости прямой ВАХ на положительную (ток инверсии  $I_{inv}$ ) у диодов FRD1 и FRD2 составляет соответственно 65 и 42 А. У диода FRD3 точка инверсии в исследуемом диапазоне тока вообще отсутствует.

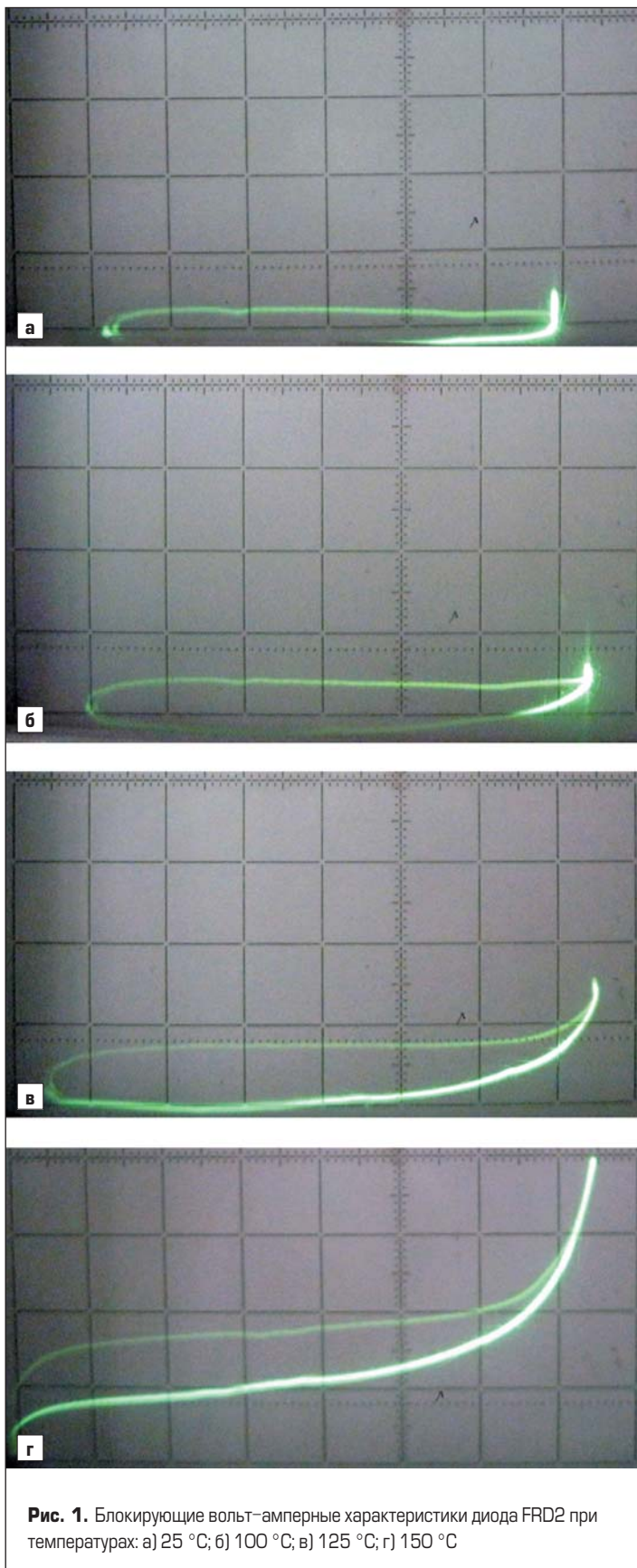


Рис. 1. Блокирующие вольт-амперные характеристики диода FRD2 при температурах: а) 25 °С; б) 100 °С; в) 125 °С; г) 150 °С

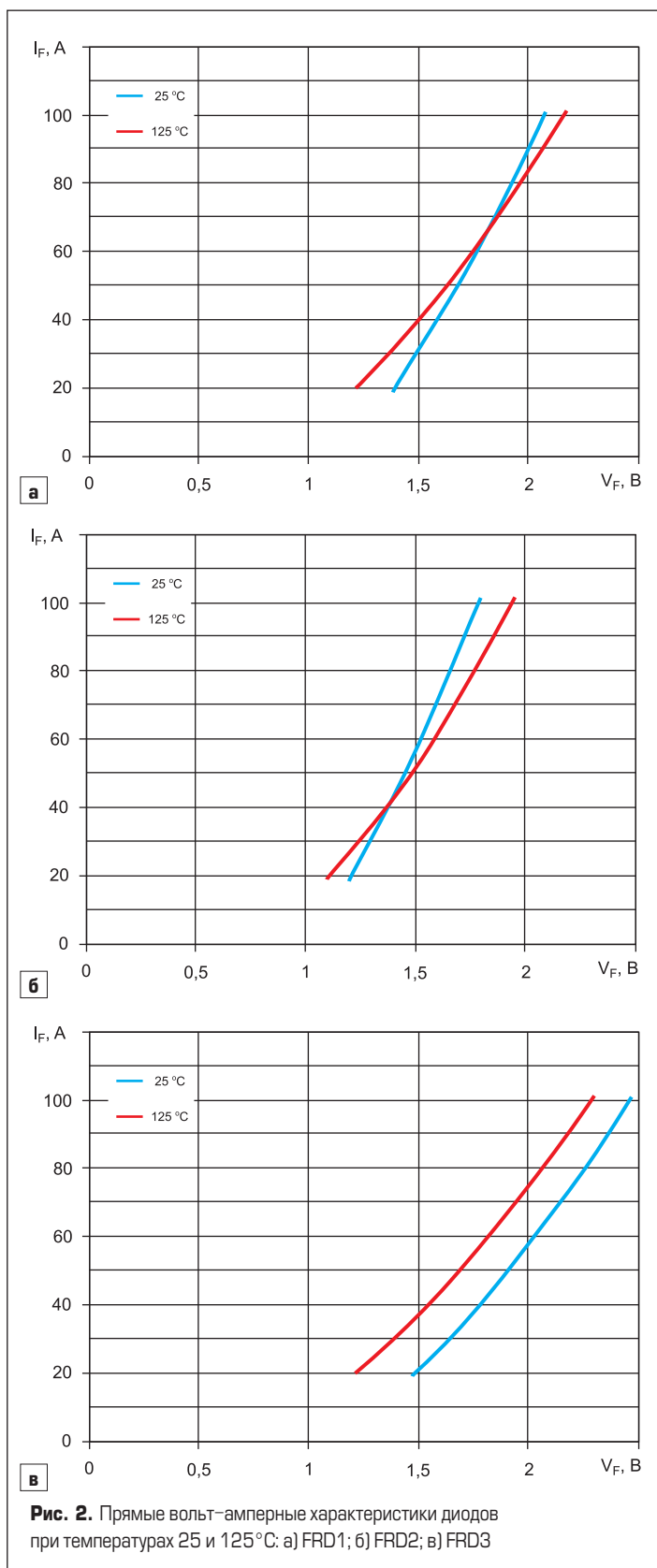


Рис. 2. Прямые вольт-амперные характеристики диодов при температурах 25 и 125 °С: а) FRD1; б) FRD2; в) FRD3

Таблица 1. Результаты измерений статических параметров

Тип прибора	Параметры и режимы измерений							
	$V_{BR}, В$		$I_R, мА$		$\Delta V_{BR}/\Delta T_r, В/°C$	$V_{rr}, В$		$I_{inv}, А$
	25 °C; $I_R = 0,5 мА$	125 °C; $I_R = 1,5 мА$	25 °C; $V_R = 1200 В$	125 °C; $V_R = 1200 В$	$\Delta T_r = 125 °C$	25 °C; $I_f = 75 А$	125 °C; $I_f = 75 А$	$T_j = 25 °C, 125 °C$
FRD1	1470	1630	0,01	0,5	1,6	1,85	1,9	65
FRD2	1380	1480	0,01	0,5	0,9	1,6	1,7	42
FRD3	1320	1410	0,005	0,3	1,25	2,2	2,0	>120

Следовательно, для параллельной работы в мощных многокристалльных модулях более предпочтительны кристаллы диодов FRD2.

В таблице 1 приведены усредненные значения статических параметров диодов всех трех типов.

### Динамические параметры диодов

Большинство применений IGBT-модулей в схемах с индуктивной нагрузкой требует антипараллельно соединенных FRD, которые выполняют функции оппозитных диодов, обеспечивая свободное протекание тока в инверторе после выключения одного из IGBT. В противном случае высокие переходные напряжения, генерируемые индуктивностью, могут разрушить IGBT. При этом повторное включение IGBT вызывает значительные градиенты тока в оппозитном диоде  $di_F/dt$  и высокие токи обратного восстановления  $I_{RM}$ . Причем чем быстрее включается IGBT, тем больше  $di_F/dt$  и  $I_{RM}$ . Скорости изменения тока, пики обратного тока и их длительность являются важнейшими факторами при выборе диода. Его поведение определяет процесс включения и потери при включении IGBT, с одной стороны, и может вызвать проблемы электромагнитного излучения — с другой.

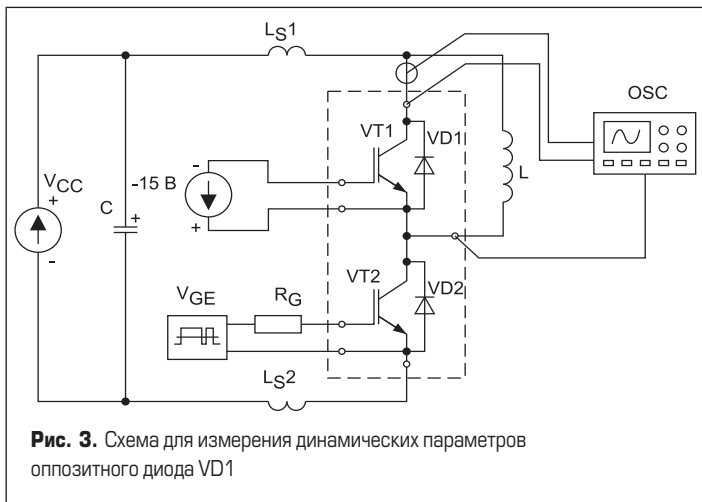


Рис. 3. Схема для измерения динамических параметров оппозитного диода VD1

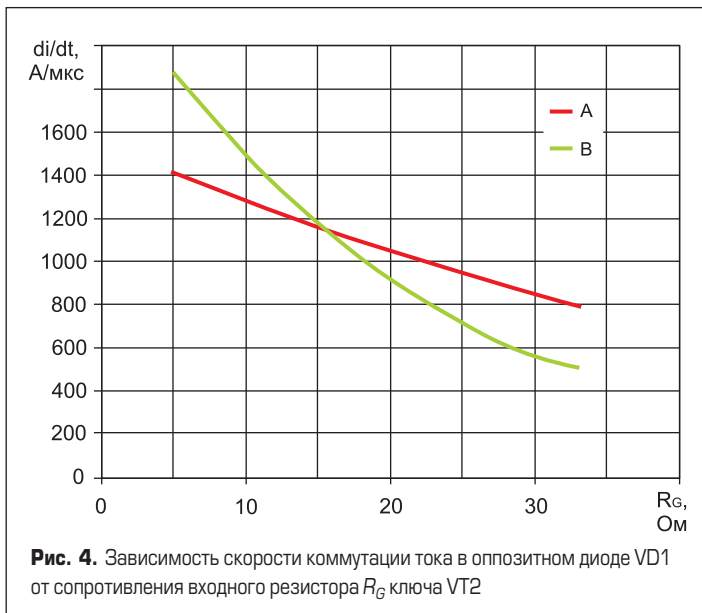


Рис. 4. Зависимость скорости коммутации тока в оппозитном диоде VD1 от сопротивления входного резистора  $R_G$  ключа VT2

Известно, что один из распространенных способов управления характеристиками переключения IGBT — подключение внешнего резистора между драйвером напряжения и затвором транзистора. От сопротивления затворного резистора  $R_G$  зависят, прежде всего, характеристики включения транзистора и энергия потерь при включении  $E_{on}$ . Кроме того, как будет показано ниже, с затворным резистором связаны и скорость изменения тока  $di_F/dt$ , и характеристики обратного восстановления оппозитного диода.

Исследования зависимостей  $di_F/dt$  от сопротивления резистора  $R_G$  а также динамических параметров диодов  $I_{RM}$ ,  $t_{rr}$ ,  $Q_{rr}$ ,  $E_{rr}$  от  $di_F/dt$  были проведены на измерительном комплексе фирмы LEMSYS с применением полумостовой испытательной схемы, изображенной на рис. 3.

На рис. 4 представлены кривые зависимости  $di_F/dt$  при обратном восстановлении оппозитного диода VD1 от сопротивления входного резистора ключа VT2, в качестве которого использовались поочередно два типа IGBT (А и В), отличающиеся характеристиками включения.

Как видно из рис. 4, при использовании в качестве ключа VT2 транзистора В наблюдается более сильно выраженная зависимость  $di_F/dt = f(R_G)$  по сравнению с типом А. А именно при уменьшении  $R_G$  с 33 до 5 Ом у транзистора В  $di_F/dt$  увеличилось с 600 почти до 2000 А/мкс (более чем в 3 раза), в то время как у транзистора А  $di_F/dt$  возросло с 800 до 1400 А/мкс (в 1,8 раза). С помощью этих транзисторов задавались скорости коммутации в полумостовой схеме при измерении динамических параметров и характеристик диодов FRD1, FRD2 и FRD3, которые поочередно включались в схему на место оппозитного диода VD1 (рис. 3).

На рис. 5–8 представлены зависимости динамических параметров диодов FRD1, FRD2 и FRD3 от скорости нарастания тока  $di_F/dt$  при обратном восстановлении диодов. Режим измерений:  $V_{CC} = 600 В$ ,  $I_C = 50 А$ ,  $T_j = 25 °C$ . Выбор температуры для демонстрации данных зависимостей в данной статье обусловлен тем, что при  $T_j = 25 °C$  наблюдалось более жесткое переключение, чем при 125 °C. При повышенных температурах скорости коммутации были ниже, а осцилляции на кривых тока обратного восстановления меньше. Это связано с ростом времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau_p$  в кремниевых структурах FRD при увеличении температуры, приводящем к замедлению переходного процесса выключения диода.

На рис. 5 показаны зависимости максимального тока обратного восстановления диодов FRD1, FRD2 и FRD3 от скорости коммутации  $di_F/dt$ .

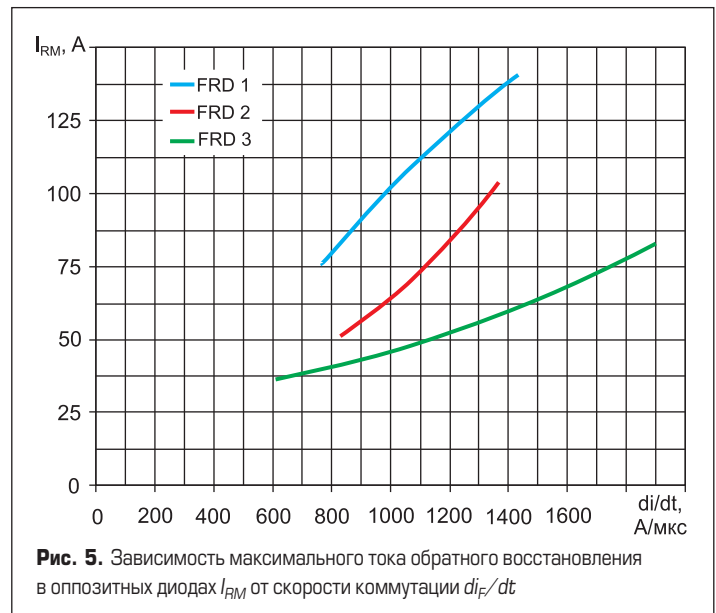
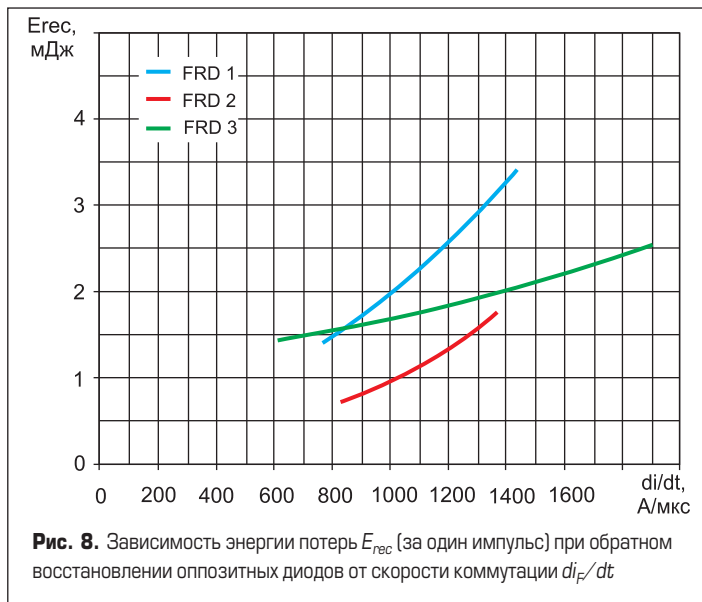
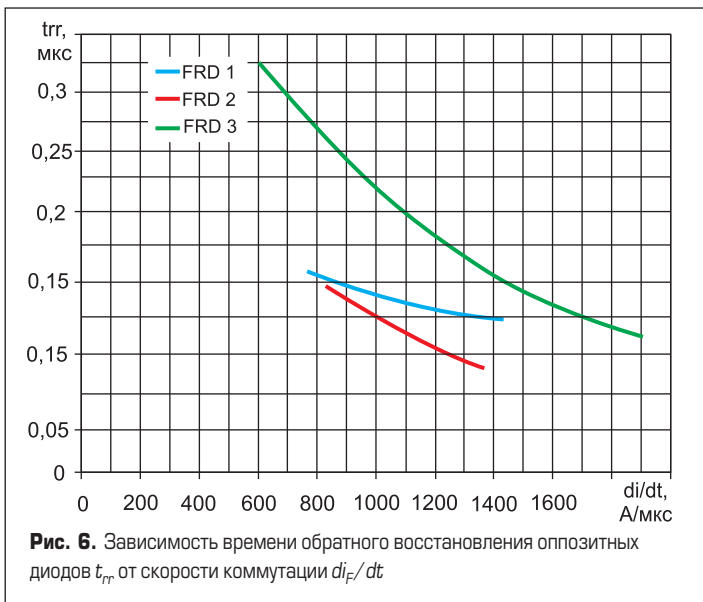


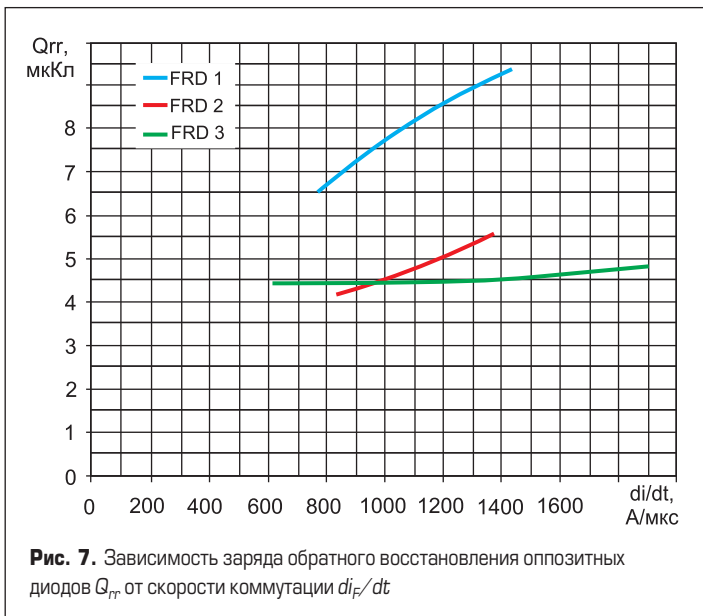
Рис. 5. Зависимость максимального тока обратного восстановления в оппозитных диодах  $I_{RM}$  от скорости коммутации  $di_F/dt$



Видно, что у всех диодов с ростом  $di_F/dt$  растет  $I_{RM}$ . Из кривых рис. 5 следует, что у диода FRD1 самые высокие значения токов обратного восстановления, а также сильная зависимость  $I_{RM}$  от  $di_F/dt$ . У диодов FRD2 токи  $I_{RM}$  меньше, чем у FRD1, в 1,5 раза, однако, так же как у диода FRD1, максимальный ток обратного восстановления резко возрастает (примерно в 2 раза) при увеличении  $di_F/dt$  от 800 до 1400 А/мкс. Самые низкие значения  $I_{RM}$  во всем исследуемом диапазоне  $di_F/dt$  у оппозитного диода FRD3. У него к тому же относительно медленный рост  $I_{RM}$  (60%) в указанном диапазоне скоростей коммутации.

На рис. 6 представлены зависимости времени обратного восстановления оппозитных диодов  $t_{tr}$  от скорости коммутации  $di_F/dt$ . Прежде всего, следует отметить, что у всех исследуемых диодов  $t_{tr}$  уменьшается с ростом  $di_F/dt$ . Причем у FRD2 и FRD3 это уменьшение наиболее резкое — примерно в 2 и в 1,4 раза соответственно. У диода FRD1  $t_{tr}$  уменьшается на 22% при изменении  $di_F/dt$  с 800 до 1400 А/мкс. Самые низкие показатели времени обратного восстановления у диодов FRD2, самые высокие — у диодов FRD3. Диоды FRD1 по величинам  $t_{tr}$  занимают промежуточное место.

На рис. 7 приведены зависимости заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  диодов FRD1, FRD2 и FRD3 от скорости изменения тока  $di_F/dt$ . У диодов FRD1 и FRD2 наблюдается сильная зависимость  $Q_{rr}$  от  $di_F/dt$ . При изменении  $di_F/dt$  от 800 до 1400 А/мкс заряд обратного восстановления у них увеличивается примерно на 40%. Следует особо отметить поведение диода FRD3. У этого прибора  $Q_{rr}$  практически не зависит от скорости коммутации тока в диапазоне 800–1400 А/мкс, небольшой рост  $Q_{rr}$  начинается только при  $di_F/dt \geq 1500$  А/мкс. К тому же у диода



FRD3 величина  $Q_{rr}$  в указанном диапазоне  $di_F/dt$  существенно меньше по сравнению с диодами FRD1 и FRD2, в особенности по сравнению с FRD1, у которого величина  $Q_{rr}$  при  $di_F/dt = 1400$  А/мкс в два раза выше  $Q_{rr}$  диода FRD3. Разница в значениях  $Q_{rr}$  у диодов FRD3 и FRD2 незначительная. Кроме этого, при скоростях коммутации ниже 1000 А/мкс величины  $Q_{rr}$  у диода FRD2 становятся даже меньше, чем у диода FRD3. Слабая зависимость  $Q_{rr}$  от  $di_F/dt$  дает диоду FRD3 преимущества перед другими типами диодов при работе прибора на высоких скоростях коммутации (при низких  $R_G$ ), обеспечивая IGBT более низкие динамические потери на повышенных частотах.

Энергия потерь при обратном восстановлении  $E_{rec}$  является одним из важнейших параметров оппозитных диодов, влияющим на общие потери в IGBT-модулях. Поэтому представляет интерес взаимосвязь  $E_{rec}$  со скоростями коммутации при выключении диодов. На рис. 8 показаны зависимости энергии потерь при выключении диодов FRD1, FRD2 и FRD3 от скорости изменения тока через каждый диод в момент его коммутации на ключ VT2. Из графиков видно, что с ростом  $di_F/dt$  от 800 до 1400 А/мкс энергия потерь у всех диодов растет, причем у FRD1 и FRD2 более чем в 2 раза, у FRD3 — на 32%. Самая высокая энергия потерь при обратном восстановлении у диодов FRD1, самая низкая у диодов FRD2. Диод FRD3, так же как и в случае с  $Q_{rr}$ , демонстрирует достаточно слабую зависимость  $E_{rec}$  от  $di_F/dt$ . Причем если в диапазоне от 800 до 1400 А/мкс он занимал по величине  $E_{rec}$  промежуточное положение между диодами FRD1 и FRD2, то при  $di_F/dt \geq 1500$  А/мкс потери у FRD3 становятся самыми низкими.

На основании полученных результатов для объективного сравнения статических и динамических параметров диодов FRD1, FRD2 и FRD3, а также выбора наиболее подходящего из них в качестве оппозитного диода для применения в IGBT-модулях, проведен формализованный расчет баллов по каждому из измеренных параметров. Лучший диод по каждому из параметров обозначен «+++», средний «++» и худший «+». Для оценки динамических параметров принималась во внимание экстраполяция результатов измерений при скоростях коммутации до 2000 А/мкс.

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

**Таблица 2.** Оценка результатов измерений статических и динамических параметров диодов FRD1, FRD2 и FRD3

Тип диода	Оценка параметра								
	Статика			Динамика			Сумма		
	$V_F$	$I_{inv}$	$\Delta V_{BR}/\Delta T_j$	$I_{RM}$	$t_{tr}$	$Q_{rr}$	$E_{rec}$	ΣСт.+ДИН.	ΣДИН.
FRD1	++	++	+++	+	+	+	+	11	4
FRD2	+++	+++	+	++	+++	++	++	16	9
FRD3	+	+	++	+++	++	+++	+++	15	11

Приведенная в таблице 2 оценка результатов исследований трех типов диодов с быстрым восстановлением показала, что лучшим по суммарному показателю «статика + динамика» является диод FRD2. Ему немного уступает (из-за статики) диод FRD3. Однако диод FRD3 превосходит все другие диоды по динамическим параметрам. Диоды FRD1 и FRD2 опережают диод FRD3 по показателю «статика», но диод FRD1 — аутсайдер по всем динамическим параметрам.

Осцилляции при обратном восстановлении

В улучшении характеристик оппозитных FRD важна оптимизация соотношения  $V_F - E_{rec}$ , а также исключение осцилляций при обратном восстановлении. Известно [2], что осцилляции присущи диодам с *pin*-структурой с высоким уровнем легирования со стороны анодной и катодной поверхностей. Известно также, что высокий уровень легирования дает малое прямое падение напряжения  $V_F$ , но, как правило, вызывает осцилляции напряжения при обратном восстановлении, особенно при повышенных значениях  $di_F/dt$ . Кроме того, для оптимизации  $V_F - E_{rec}$  часто применяется снижение времени жизни неосновных носителей заряда с помощью электронного облучения. Оно снижает время обратного восстановления и ток обратного восстановления, что улучшает соотношение  $V_F - E_{rec}$ . Однако сокращение  $\tau_p$  может вызвать резкое схлопывание тока обратного восстановления в интервале хвостового тока, что приводит к осцилляциям и связанным с ними проблемам электромагнитных помех и даже к выходу прибора из строя. Осцилляции в IGBT-модулях подробно описаны в работе [3], они связаны как со свойствами структур FRD и IGBT, так и с паразитной индуктивностью схемы применения и самого IGBT-модуля. Осцилляций удастся избежать, если применять FRD с мягким обратным восстановлением. Возможны другие контрмеры против осцилляций при восстановлении FRD, например, за счет уменьшения паразитной индуктивности и симметрирования расположения кристаллов FRD и IGBT в модуле. Крайняя мера борьбы с осцилляциями — увеличение сопротивления затворного резистора  $R_G$ , однако этот метод одновременно повышает динамические потери в IGBT модулях.

Для наблюдения осцилляций при обратном восстановлении исследуемых диодов были измерены и проанализированы осциллограммы процесса восстановления при средних и высоких скоростях коммутации.

На рис. 9 представлены кривые токов  $i_R(t)$  и напряжений  $v_R(t)$  при обратном восстановлении оппозитных диодов при средних скоростях коммутации.

Измерения проведены на скоростях коммутации  $di_F/dt$ , не превышающих 800 А/мкс. Они обеспечивались сопротивлением входного резистора ключа VT2, равным 33 Ом. Из представленных осциллограмм видно, что максимальные токи обратного восстановления  $I_{RM}$  у диодов FRD1, FRD2 и FRD3, измеренные в режиме:  $V_{CC} = 600$  В,  $I_F = 50$  А,  $R_G = 33$  Ом,  $T_j = 25$  °С, равны соответственно 72, 50 и 35 А. Форма кривых тока и напряжения  $v_R(t)$  у всех диодов достаточно гладкая. Тем не менее у диода FRD1 (рис. 9а) уже наблюдается слабая осцилляция напряжения сразу после завершения процесса обратного восстановления. Следует отметить кривую тока обратного восстановления  $i_R(t)$  диода FRD3 (рис. 9в), которая (в отличие от FRD1 и FRD2) имеет форму, характерную для диодов с мягким восстановлением.

На рис. 10 представлены осциллограммы обратного восстановления оппозитных диодов при высоких скоростях коммутации. Скорости коммутации (1400–2000 А/мкс) обеспечивались уменьшением сопротивления входного резистора транзисторного ключа VT2 до 5 Ом.

Из рис. 10 видно, что все исследуемые диоды при скоростях коммутации  $di_F/dt$  свыше 1400 А/мкс имеют ярко выраженные осцилляции тока и напряжения, которые возникли на последнем временном интервале спада обратного тока. Режим измерения:  $V_{CC} = 600$  В,  $I_F = 50$  А,  $R_G = 5$  Ом,  $T_j = 25$  °С. Амплитуды токов обратного восстановления при этих  $di_F/dt$  увеличились более чем в 2 раза по сравнению с  $di_F/dt = 800$  А/мкс и достигли значений у диодов FRD1, FRD2 и FRD3 соответственно 150, 100 и 80 А/мкс. Форма напряжения на осциллограммах, по сути, повторяет форму тока и соответствует выключению диодов со схлопыванием тока. В данном случае резкий обрыв тока приводит к выбросу тока в прямом направлении. Диод вновь выключается, генерируются второй и третий пики напряжения и, наконец, происходит затухающая LC-осцилляция, частота которой определяется емкостью диода и паразитной индуктивностью.

Первые броски токов приводят к наиболее высоким пикам перенапряжений. На рис. 10а у диода FRD1 хорошо виден первый пик перенапряжения амплитудой почти 800 В, у диода FRD2 (рис. 10б) пик перенапряжения составляет примерно 540 В. Диод FRD3, обладающий мягкой характеристикой обратного восстановления (рис. 9в), имеет самую слабую осцилляцию на кривых  $i_R(t)$  и  $v_R(t)$ , а первый пик пере-

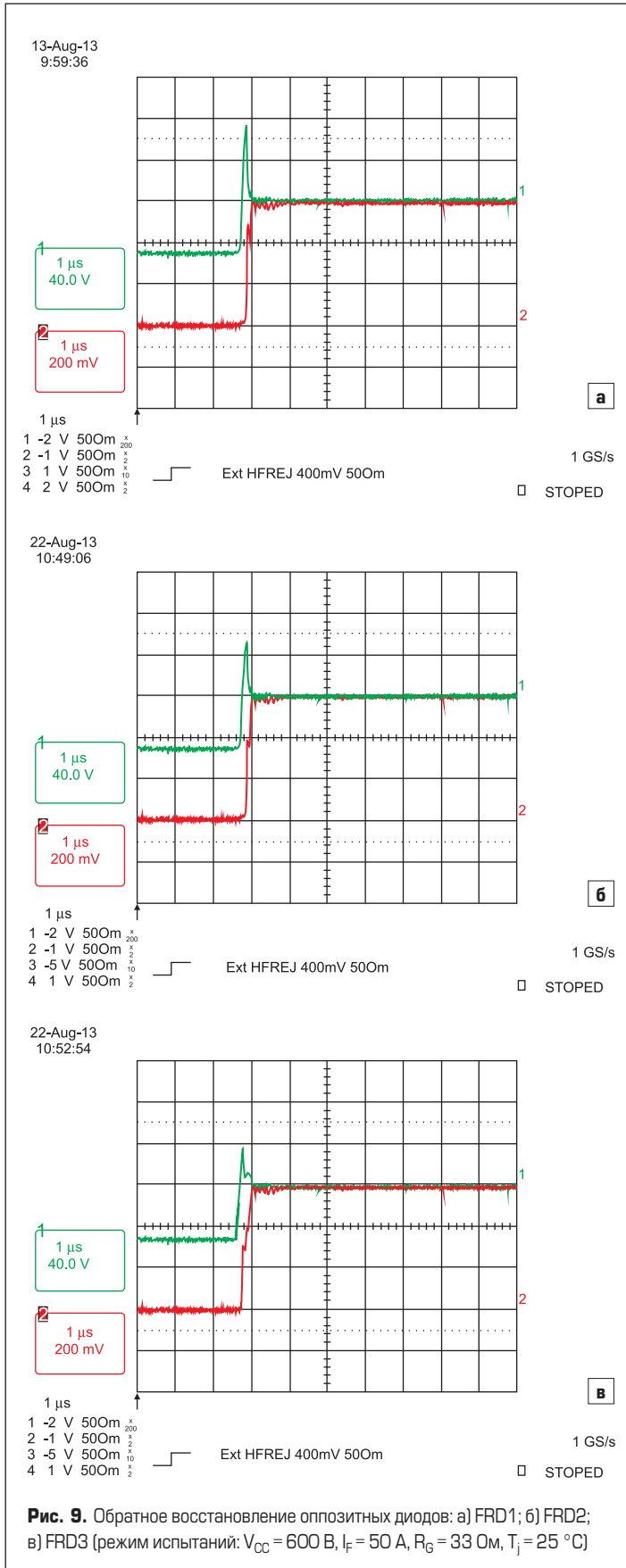


Рис. 9. Обратное восстановление оппозитных диодов: а) FRD1; б) FRD2; в) FRD3 (режим испытаний:  $V_{CC} = 600$  В,  $I_F = 50$  А,  $R_G = 33$  Ом,  $T_j = 25$  °С)

напряжения всего около 200 В (рис. 10в). Если учесть, что напряжение питания от шины постоянного тока для IGBT-модуля на напряжение 1200 В составляет 600 В, то максимальное напряжение на диоде FRD1 с учетом перенапряжений, генерируемых при обратном восстановлении, может достичь значения 1400 В и вывести прибор из строя. Максимальное напряжение на диоде FRD2 вместе с пиками перенапряжений приближается к 1200 В, что также вызывает угрозу пробоя

модуля. В случае с диодом FRD3 перенапряжения далеки от опасного уровня и не влияют на надежную работу прибора.

Осцилляции при обратном восстановлении диодов могут вызвать электромагнитные помехи. На рис. 10 видно, что период колебаний на кривых тока и напряжения с осцилляциями находится в диапазоне 20–40 нс, что соответствует частоте 25–50 МГц. При таких частотах происходит излучение электромагнитных волн, способное стать причиной сбоев в системе управления и несовместимости с другим электронным оборудованием. Осцилляций при выключении диодов следует избегать не только из-за электромагнитного излучения, но и потому, что они могут дополнительно повышать динамические потери в IGBT-модулях и приводить к тепловым отказам.

**Заключение**

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Из трех исследованных быстровосстанавливающихся диодов, изготовленных различными производителями, диод FRD3, несмотря на более высокие статические потери, максимально подходит для работы в качестве оппозитного диода в IGBT-модулях. Он имеет самые низкие амплитуды обратных токов  $I_{RM}$  и заряд обратного восстановления, обладает мягкой характеристикой выключения, что позволяет применять его в ключевых схемах с быстропереключающимися IGBT при высоких скоростях коммутации. При использовании диода FRD3 нет необходимости искусственно снижать скорости коммутации с помощью увеличения сопротивления внешнего затворного резистора. Это позволяет обеспечить низкие потери при включении транзистора, низкий уровень электромагнитных помех или вообще их отсутствие и, в конечном итоге, максимально использовать коммутирующие возможности современных IGBT.

Диоды FRD1 и FRD2 имеют низкие статические потери, но высокие значения  $I_{RMP}$ ,  $Q_{rr}$  (особенно у FRD1) и индуцированные осцилляции при высоких скоростях коммутации ( $di/dt \geq 800$  А/мкс) ограничивают их применение в IGBT-модулях, действующих на повышенных частотах ( $\geq 10$  кГц). Это означает, что диоды FRD1 и FRD2 могут работать только с транзисторами со сравнительно медленным включением, например с IGBT, у которых  $di/dt < 500$  А/мкс, либо с быстровключающимися транзисторами ( $di/dt > 800$  А/мкс), но с применением внешних затворных резисторов с номиналом сопротивления  $R_G$  выше 30 Ом. Однако надо учитывать, что и в том и в другом случаях динамические потери при включении IGBT будут выше, чем при использовании комбинации «быстрый IGBT/диод FRD3».

Для улучшения динамических характеристик у диодов FRD1 и FRD2, в том числе для решения проблем с осцилляциями, производителям следует воспользоваться имеющимся у них хорошим заделом — очень низким прямым падением напряжения. Необходимо пойти, например, по пути снижения коэффициента инжекции анодного  $p-n$ -перехода за счет снижения концентрации легирующей примеси и времени жизни неосновных носителей заряда в  $p$ -слое, комбинированного применения электронного и протонного облучения [4]. Это может несколько увеличить прямые падения напряжения, но уменьшит ток и заряд обратного восстановления, существенно улучшит характеристики обратного восстановления быстродействующих диодов, работающих при скоростях коммутации выше 800 А/мкс.

**Литература**

1. П. Р. Машевич, В.А. Мартыненко, В. Г. Мускатиньев и др. Исследования параметров и характеристик обогащено-планарных IGBT с малыми потерями на напряжение 1200 В // Силовая электроника. 2013. № 4.
2. Katsumi Satoh, Tetsuo Takahashi, Hidenori Fujii et al. New chip design technology for next generation power module. Mitsubishi Electric Corporation. May 2008.
3. J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, R. De Doncker. Semiconductor Power Devices. Physics, Characteristics, Reliability. Springer, 2011.
4. J. Vobecky, P. Hazdra, N. Galster, E. Carroll. Free-wheeling diodes with improved reverse recovery by combined electron and proton irradiation. PEMC' 98 Prague.

