

# ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОПИСАНИЙ СИЛОВЫХ WBG-УСТРОЙСТВ

**РЁ ТАКЕДА (RYO TAKEDA)**, разработчик архитектуры решений, Keysight  
**БЕРНХАРД ХОЛЬЦИНГЕР (BERNHARD HOLZINGER)**, технический архитектор систем, Keysight  
**МИХАЭЛЬ ЦИММЕРМАН (MICHAEL ZIMMERMAN)**, разработчик, Keysight  
**МАЙК ХОУС (MIKE HAWES)**, консультант по силовому оборудованию, Keysight  
[www.bodospower.com](http://www.bodospower.com)

*С появлением приборов с широкой запрещенной зоной (WBG) прежние методы и стандарты тестирования утратили способность учитывать возможности новых полупроводниковых технологий. В результате в технических описаниях этих приборов появилось немало некорректных значений параметров. В статье представлены практические рекомендации по измерению и выбору динамических параметров силовых полупроводников, позволяющие скорректировать полученные результаты и соответствующие им значения в технических описаниях.*

## ВВЕДЕНИЕ

Много статей нашей компании посвящено проблемам, связанным с получением воспроизводимых и надежных результатов измерений динамических характеристик, а также измерений методом двойных импульсов (DPT). Разработчикам силовых преобразователей необходимо иметь возможность соотнести динамические характеристики, заявленные в технических описаниях, с результатами измерения характеристик силовых приборов. В технических описаниях силовых устройств на основе карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN) приводится множество динамических характеристик. Мы рассмотрим характеристики переключения ( $t_{D(ON)}$ ,  $t_r$ ,  $E_{(ON)}$ ,  $t_{D(OFF)}$ ,  $t_p$ ,  $E_{(OFF)}$ ) и характеристики обратного восстановления ( $t_{RR}$ ,  $I_{RRM}$ ,  $Q_{RR}$ ). Измерения и выбор значений заряда затвора и  $R_{DS(ON)}$  рассматриваются в других статьях.

## КОММУТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В таблице 1 представлены типичные значения параметров переключения SiC MOSFET на 1200 В. Сначала требуется определить схему установки для испытаний методом двойных импульсов и условия тестирования. Поскольку DPT-установки не стандартизованы, производитель устройства обычно приводит в описании упрощенную схему испытательной установки (см. рис. 1). При сравнении проектируемой схемы со схемой,

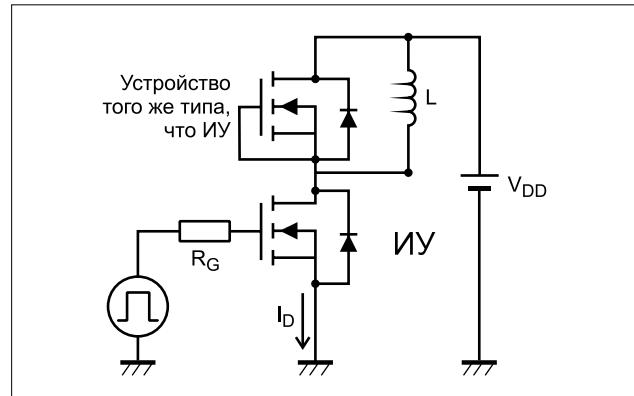


Рис. 1. Упрощенная схема установки для испытаний методом двойных импульсов

представленной в техническом описании, следует учитывать ряд факторов.

**– Какое устройство используется в «верхнем плече» схемы для испытаний методом двойных импульсов?** Назначение ключа в верхнем плече – дать возможность заряду, накопленному в катушке индуктивности в выключенном состоянии, протечь через испытуемое устройство (ИУ) при поступлении следующего импульса. С этой целью используется либо

Таблица 1. Коммутационные характеристики из технического описания при  $T = 25^\circ\text{C}$  (если не указано иное значение)

Обозначение	Параметр	Мин.	Тип.	Макс.	Условия испытаний
$E_{ON}$	Энергия включения (SiC Diode FWD)		3,05 мДж		$V_{DS} = 800 \text{ В}; V_{GS} = -4 \text{ В}/15 \text{ В}; I_D = 50 \text{ А}; R_{G(ext)} = 5 \text{ Ом}; L = 65,7 \text{ мкГн}; T_J = 175^\circ\text{C}$
$E_{OFF}$	Энергия выключения (SiC Diode FWD)		1,67 мДж		
$E_{ON}$	Энергия включения (Body Diode FWD)		4,65 мДж		$V_{DS} = 800 \text{ В}; V_{GS} = -4 \text{ В}/15 \text{ В}; I_D = 50 \text{ А}; R_{G(ext)} = 5 \text{ Ом}; L = 65,7 \text{ мкГн}; T_J = 175^\circ\text{C}$
$E_{OFF}$	Энергия выключения (Body Diode FWD)		1,58 мДж		
$t_{D(on)}$	Задержка при включении		142 нс		
$t_r$	Время нарастания фронта		27 нс		$V_{DD} = 800 \text{ В}; V_{GS} = -4 \text{ В}/15 \text{ В}; R_{G(ext)} = 2,5 \text{ Ом}; L = 65,7 \text{ мкГн}.$
$t_{D(off)}$	Задержка при выключении		72 нс		Определение временных интервалов осуществляется по уровню $V_{DS}$ , индуктивная нагрузка
$t_f$	Время спада фронта		25 нс		

то же устройство (Body Diode FWD – паразитный диод) при его наличии, либо обычный диод (SiC Diode FWD). Поскольку выходная емкость ( $C_{OSS}/C_{DS}$ ) устройства в верхнем плече образует резонансный контур с индуктивностью силового контура при включении, иногда применяется простой диод, обеспечивающий достаточно «чистые» сигналы для экстракции параметров переключения. Кроме того, ток обратного восстановления ( $I_{RRM}$ ) устройства в верхнем плече добавляется к току  $I_D$  в начале второго импульса, искажая характеристики переключения ИУ (т.е. увеличивая потери при включении).

#### **- Нагрузка на переключение носит резистивный или индуктивный характер?**

Прежние тесты параметров переключения часто проводились с резистивными нагрузками. С появлением IGBT- и WBG-приборов переключение на более высоких частотах создает дополнительные проблемы для разработчиков. Индуктивные нагрузки, которые точнее моделируют фактические нагрузки (например, обмотки двигателя), стали нормой для определения характеристик переключения. Иногда в условиях испытаний упоминается нагрузочная

катушка индуктивности (например,  $L = 65,7 \text{ мГн}$ ). Она используется для обеспечения заданного тока  $I_D$  и не входит в силовой контур.

#### **- В каких условиях эксплуатации тестируется устройство?**

В таблице 1 представлены следующие значения типичных параметров:

- $V_{DD}/V_{BS} = 800 \text{ В}$ ;
- $I_D = 50 \text{ А}$ ;
- $R_{G(ext)} = 2,5 \text{ Ом}$ ;
- $V_{GS} = 15/-4 \text{ В}$ ;
- температура =  $25/175^\circ\text{C}$ .

В схему испытаний методом двойного импульса иногда включаются паразитные импедансы (см. рис. 2). Эти паразитные составляющие оказывают значительное влияние на точность DPT-системы. Если разработчик DPT-системы не учитывает эти паразитные составляющие, полученные сигналы часто отражают результаты измерения характеристик самой системы в дополнение к характеристикам ИУ. Таким образом, эти составляющие становятся причиной расхождений между результатами измерений и значениями, указанными в техническом описании, даже если другие условия испытаний соблюdenы.

Паразитные импедансы трудно измерить. Однако известно несколько

общепринятых способов определения индуктивности силового контура:

$$L_{PL} = L_{PL1} + L_{PL2} + L_{SHUNT}.$$

Один из них состоит в выборе значения  $L_{PL}$  с помощью формулы для расчета напряжения на индуктивности:

$$V = Ldi/dt.$$

Измерив  $V$  и  $di/dt$  по первой просадке напряжения  $V_{DS}$  во время включения, можно приблизительно рассчитать  $L_{PL}$  для DPT-системы (см. рис. 3). Используется один дополнительный параметр условий тестирования, чтобы свести к минимуму звон, вызванный паразитными составляющими.

#### **- Какой внешний резистор затвора $R_G$ используется?**

$R_G$  используется для замедления сигнала управления затвором и, следовательно, для минимизации звона 2-го порядка, вызванного, в первую очередь, индуктивностью  $L_{PL}$  и выходной емкостью  $C_{OSS}$ . Чем больше  $R_G$ , тем медленнее нарастают и спадают импульсы, и, следовательно, меньше звон. Однако при этом увеличивается время переключения и потери энергии. В результате ухудшаются харак-

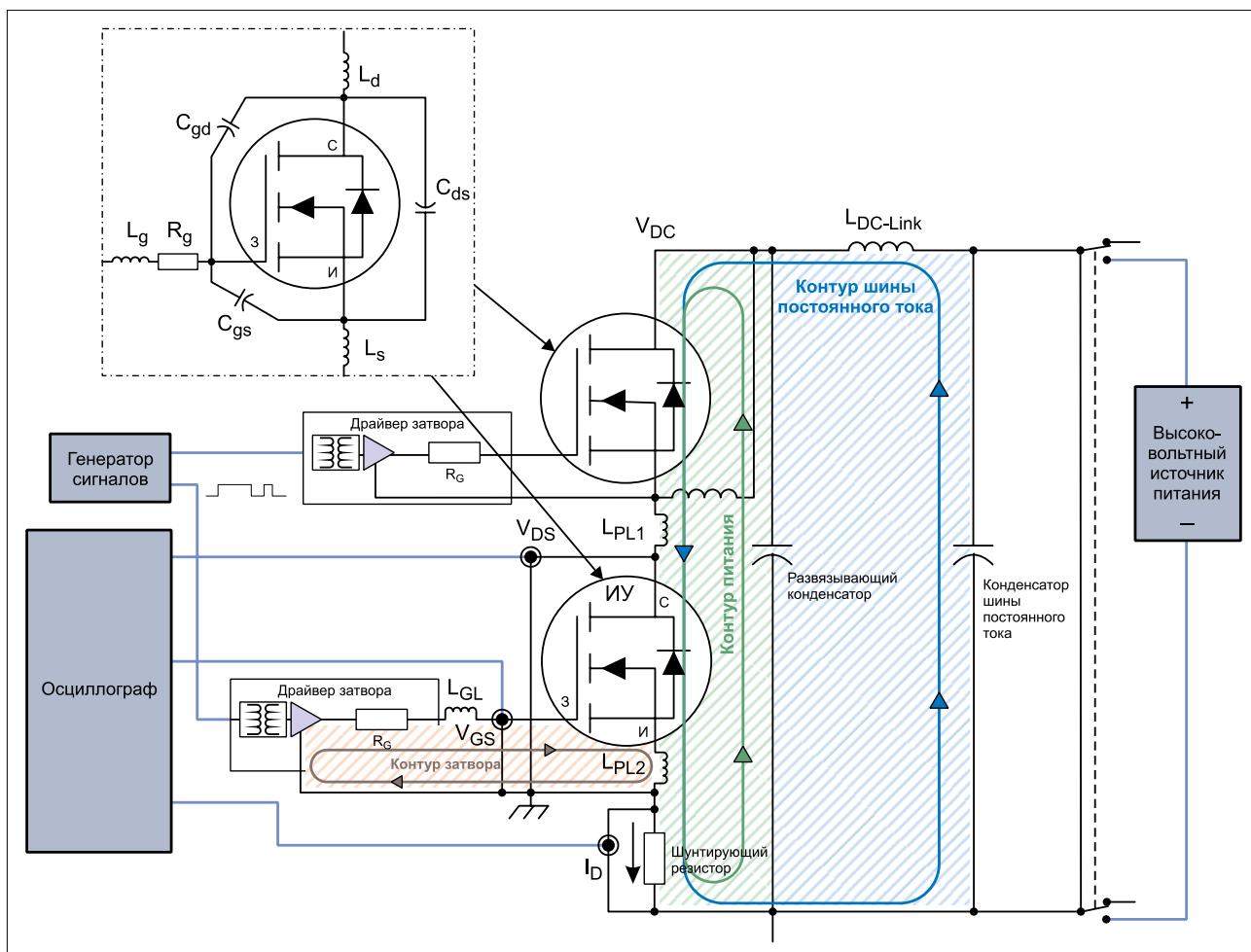


Рис. 2. Схема установки для испытаний методом двойных импульсов с паразитными элементами устройства и системы

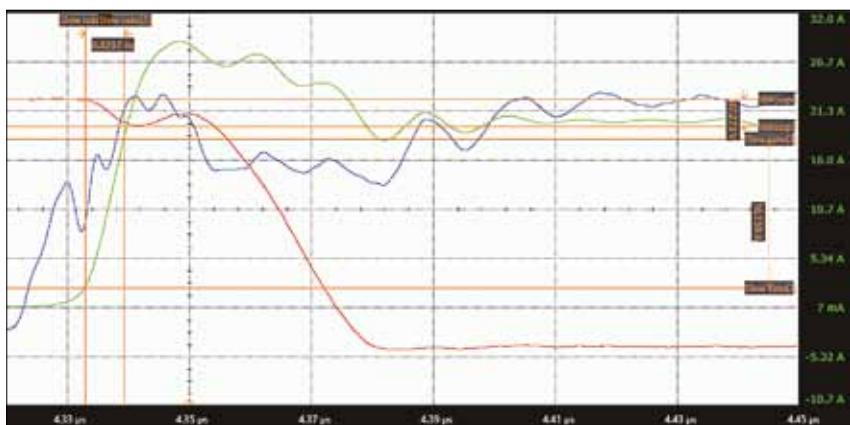


Рис. 3. Расчет паразитной индуктивности силового контура по результатам измерения:

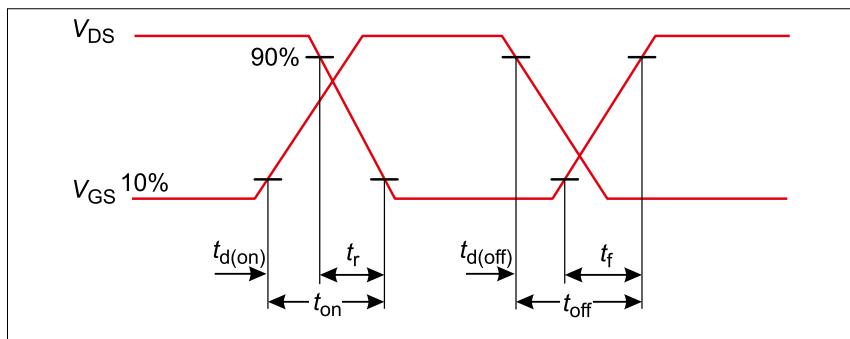
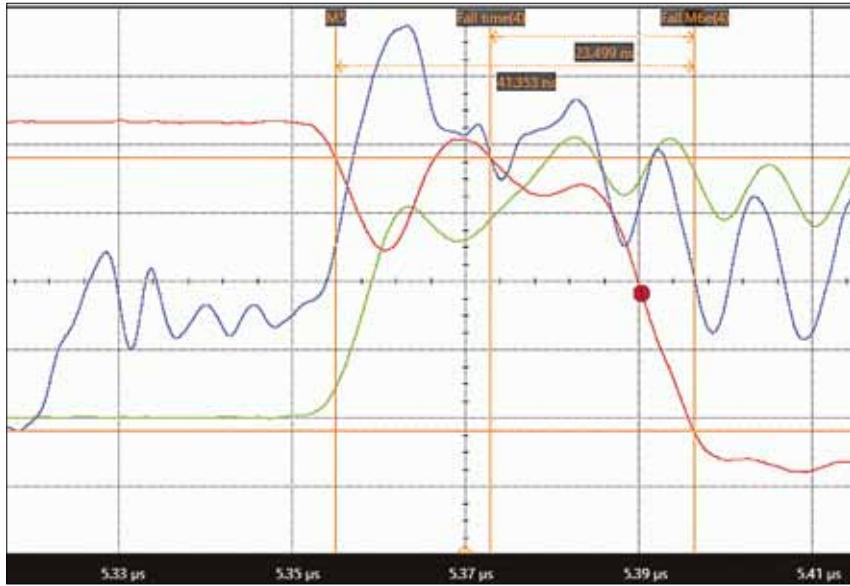
 $L_p = 87,27 \text{ В}/(16,16 \text{ А}/6,43 \text{ нс} = 35 \text{ нГн})$ 

Рис. 4. Метод извлечения параметров переключения

Рис. 5. Событие включения ( $V_{DS}$  – красный;  $I_D$  – зеленый;  $V_{GS}$  – синий)

теристики переключения, указанные в техническом описании. Таким образом, в технических описаниях указано много разных значений  $R_{Gf}$ , соответствующих некой оптимизированной ситуации, когда звон еще не мешает получить воспроизводимые параметры, а время нарастания и спада фронтов импульсов не слишком большое. На время включения и выключения также влияют микросхемы управления затвором и вспомогательная схема.

Для определения динамических характеристик выбираются требуемые параметры из осциллограмм. Посколь-

ку известен не один способ извлечения параметров из сигналов, в технических описаниях часто указывается схема применявшегося метода (см. рис. 4) или ссылка на стандарт (например, IEC 60747-8).

Даже в этом случае инженеру-испытателю приходится интерпретировать полученные результаты. Из-за звона могут наблюдаться многократные пересечения порогового значения (см. рис. 5). Например, как интерпретировать  $t_r$  на рисунке 5? Величина этого параметра определяется как время спада напряжения  $V_{DS}$  с 90% до 10%. Если

используется первое пересечение 90% порогового значения (верхний горизонтальный оранжевый маркер), то  $t_r \sim 41$ . Если же измерять результат по третьему пересечению 90%-порога, то этот показатель составит около 23 нс. Стандартные определения для выбора значений параметров не всегда дают согласующиеся результаты, если в измеряемых сигналах имеется звон. Необходимо разработать новые стандарты, учитывающие неизбежный звон в сигналах переключения, чтобы значения параметров в большей мере соответствовали действительности.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Теперь давайте исследуем характеристики обратного восстановления. Таблица 2 является типичным фрагментом технического описания 1200-V SiC MOSFET нескольких характеристик обратного восстановления.

Время ( $t_{RR}$ ), заряд ( $Q_{RR}$ ) и пиковый ток обратного восстановления ( $I_{RRM}$ ) являются наиболее распространенными параметрами, указанными в технических описаниях. Во многих установках для испытаний методом двойных импульсов нагрузочная катушка индуктивности  $L$  подключается к заземлению, и тестируется паразитный диод в ИУ (в устройстве в нижнем плече). Устройство в нижнем плече выключается, а устройство в верхнем плече получает импульс, который питает  $L$  заданным током. В одних технических описаниях указывается испытательная установка, тогда как в других эта информация отсутствует, и определены только условия тестирования.

Известны общепринятые условия эксплуатации, указанные для характеристик обратного восстановления. Они аналогичны тем, которые определены для коммутационных характеристик:

- $V_{DD}/V_{DS} = 800 \text{ В}$ ;
- $I_D = 50 \text{ А}$ ;
- температура =  $175^\circ\text{C}$ .

Однако роль  $V_{GS}$  в обратном восстановлении – другая. В примере на рисунке 6 напряжение  $V_{GS}$  равное  $-4 \text{ В}$  относится к выключению ИУ с паразитным диодом, который проходит тестирование. В примечании определяются максимальные значения  $V_{GSmax} = -4 \text{ В}/19 \text{ В}$  для управления MOSFET верхнего плеча в конфигурации DPT-установки. Этот ключ управляет двойными импульсами для тестирования обратного восстановления ИУ (запертый MOSFET). Чуть ниже мы назовем причину, по которой указано лишь максимальное значение напряжения.

Последним условием тестирования является параметр  $di_f/dt$  (1000 А/мкс). Этот параметр требует определиться

Таблица 2. Характеристики обратного восстановления ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ , если не указано иное значение)

Обозначение	Параметр	Тип.	Макс.	Условия тестирования
$V_{SD}$	Прямое напряжение диода	4,6 В		$V_{GS} = -4 \text{ В}; I_{SD} = 25 \text{ А}; T_j = 25^\circ\text{C}$
		4,2 В		$V_{GS} = -4 \text{ В}; I_{SD} = 25 \text{ А}; T_j = 175^\circ\text{C}$
$I_s$	Непрерывный прямой ток диода		90 А	$V_{GS} = -4 \text{ В}; T_j = 25^\circ\text{C}^*$
$I_{s,pulse}$	Импульсный ток диода		200 А	$V_{GS} = -4 \text{ В}, \text{ширина импульсов } t_p \text{ ограничена } T_{Jmax}^*$
$t_{RR}$	Время обратного восстановления	81 нс		
$Q_{RR}$	Заряд обратного восстановления	879 нКл		$V_{GS} = -4 \text{ В}; I_{SD} = 50 \text{ А}; V_R = 800 \text{ В}; dI_p/dt = 1000 \text{ А/мкс}; T_j = 175^\circ\text{C}^*$
$I_{RBM}$	Ток обратного восстановления (пик.)	19 А		

\*  $V_{GSmax} = -4 \text{ В}/19 \text{ В}$  при использовании внутреннего диода MOSFET.

с тем, как была проведена экстракция формы сигнала. Поскольку существует несколько отраслевых стандартов, которые определяют выбор значений параметров обратного восстановления, необходимо понимать, какой из них имеется в виду. И, как упоминалось выше, в технических описаниях с этой целью часто приводятся соответствующие разъяснения (см. рис. 6).

$I_F$  – прямой ток через паразитный диод (текущий в направлении противоположном току в MOSFET), который протекает через диод между двумя импульсами. В момент поступления второго импульса ток течет через другой MOSFET, что препятствует протеканию тока во внутреннем диоде, что позволяет измерить параметры обратного восстановления. Ток снижается до 0 А со скоростью  $dI_F/dt$ . По мере того, как ток становится отрицательным, начинается обратное восстановление (см. рис. 6).

Напрашивается вывод, что  $dI_F/dt$  – это исходная величина, которую можно определить в собственной испытательной системе, поскольку она указана в условиях эксплуатации. Однако  $dI_F/dt$  контролируется двумя другими условиями тестирования:

- величиной внешнего резистора затвора  $R_G$  для управления MOSFET;
- величиной напряжения затвор–исток  $V_{GS}$  для управления MOSFET верхнего плача.

Теперь становится понятным значение примечания в таблице 2.

Таким образом, процесс измерения параметров обратного восстановления является итеративным. Необходимо выбрать значения  $R_G$  и  $V_{GS}$  и запустить DPT-систему, чтобы получить значение  $dI_F/dt$ . Если оно ниже требуемого условия тестирования, то  $R_G$  можно уменьшить, чтобы ускорить отклик, или увеличить  $V_{GS}$  с той же целью. Затем формируется второй импульс, чтобы увидеть, как изменения в  $R_G$  или  $V_{GS}$  повлияли на результирующее значение  $dI_F/dt$ . Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое

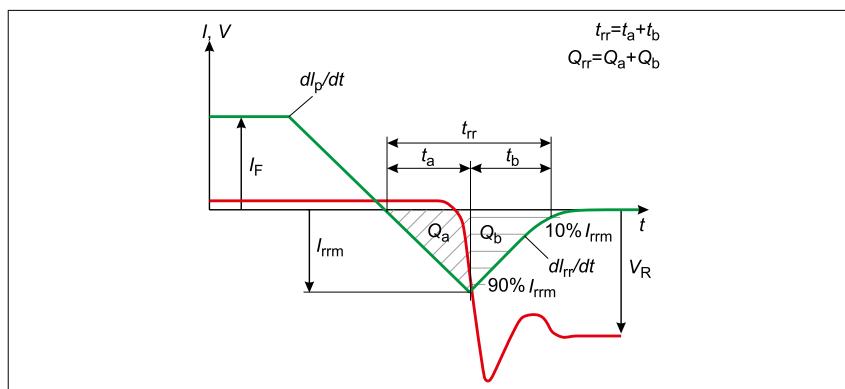


Рис. 6. Метод извлечения параметров обратного восстановления

значение  $dI_F/dt$ . На практике  $R_G$  обычно используется как грубая настройка для определения  $dI_F/dt$ , пока наклон кривой фронта импульса не станет близким к заданному значению. После этого для точной настройки  $dI_F/dt$  проще воспользоваться вариациями  $V_{GS}$ .

Наконец, выбор значения  $dI_F/dt$  может осуществляться разными способами. Один стандарт определяет, что эту скорость следует рассчитывать от величины 50%  $I_F$  до 75%  $I_{RBM}$ . Другие же стандарты определяют скорость изменения тока на ниспадающем участке кривой  $I_F/I_R$  и определяют ее максимум как  $dI_F/dt$ . Таким образом, следует проявлять осторожность при выборе корректного значения  $dI_F/dt$  из технических описаний с учетом этих особенностей.

## ВЫВОДЫ

Интерпретация и подтверждение динамических характеристик силовых полупроводников, указанных в технических описаниях, – непростая задача. Имеется немало важных аспектов проведения испытаний с помощью измерительной установки, которые не включены в условия тестирования. Кроме того, в разных технических описаниях применяются разные подходы к извлечению параметров из сигналов переключения и сигналов обратного восстановления. Чтобы помочь в разработке стандартов для устройств с широкой запрещенной зоной, в сентябре 2017 г. были предложены стандарты JEDEC JC-70 для составления

отраслевых стандартных тестов для GaN- и SiC-приборов. В каждом подкомитете имеются рабочие группы, занятые разработкой процедур обеспечения надежности и квалификации, элементов и параметров технических описаний, а также методов испытаний и определения характеристик. Компания Keysight участвует в разработке стандарта JC-70 подгруппами GaN и SiC.

Компания Keysight разработала динамический анализатор силовых устройств PD1500A как дополнительное решение для определения динамических характеристик к анализаторам силовых устройств B1505A/B1506A. Наши приборы обеспечивают воспроизводимые и надежные динамические измерения методом двойных импульсов для силовых полупроводников на основе Si/SiC в корпусе. Мы продолжаем инвестировать в исследования и разработку в области современных способов измерения методом двойных импульсов. Недавно мы представили настраиваемую плату для тестирования GaN FET, которая работает со стандартной системой PD1500A. Методы тестирования PD1500A соответствуют требованиям, установленным стандартом JC-70.

За дополнительной информацией о динамическом анализаторе устройств питания PD1500A компании Keysight обращайтесь на [www.keysight.com/find/PD1500A](http://www.keysight.com/find/PD1500A). В последующих статьях от Keysight обсуждаются воспроизводимые и надежные результаты тестирования методом двойных импульсов.