

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

РЁ ТАКЕДА (RYO TAKEDA), разработчик архитектуры решений, Keysight
БЕРНАРД ХОЛЬЦИНГЕР (BERNHARD HOLZINGER), технический архитектор систем, Keysight
МИХАЭЛЬ ЦИММЕРМАН (MICHAEL ZIMMERMAN), разработчик, Keysight
МАЙК ХОС (MIKE HAWES), консультант по силовому оборудованию, Keysight

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 соотносить 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_{F} , 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,

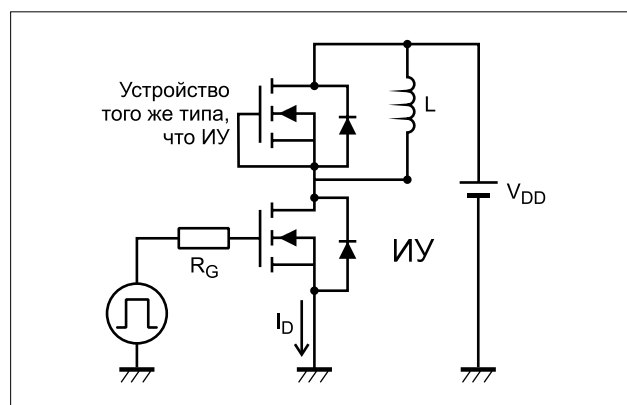


Рис. 1. Упрощенная схема установки для испытаний методом двойных импульсов

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		$V_{DD} = 800 \text{ В}; V_{GS} = -4 \text{ В}/15 \text{ В}; R_{G(ext)} = 2,5 \text{ Ом}; L = 65,7 \text{ мкГн}.$ Определение временных интервалов осуществляется по уровню V_{DS} , индуктивная нагрузка
t_R	Время нарастания фронта		27 нс		
$t_{D(off)}$	Задержка при выключении		72 нс		
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, $L = 65,7 \text{ мкГн}$). 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:

- $V_{DD}/V_{DS} = 800 \text{ В}$;
- $I_D = 50 \text{ А}$;
- $R_{G(ext)} = 2,5 \text{ Ом}$;
- $V_{GS} = 15/-4 \text{ В}$;
- 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 соблюдены.

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:

$$V = L di/dt$$

Измерив V и di/dt по первой просадке напряжения V_{DS} во время включения, можно приблизительно рассчитать L_{PL} для DTP-системы (см. рис. 3). Используются 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-

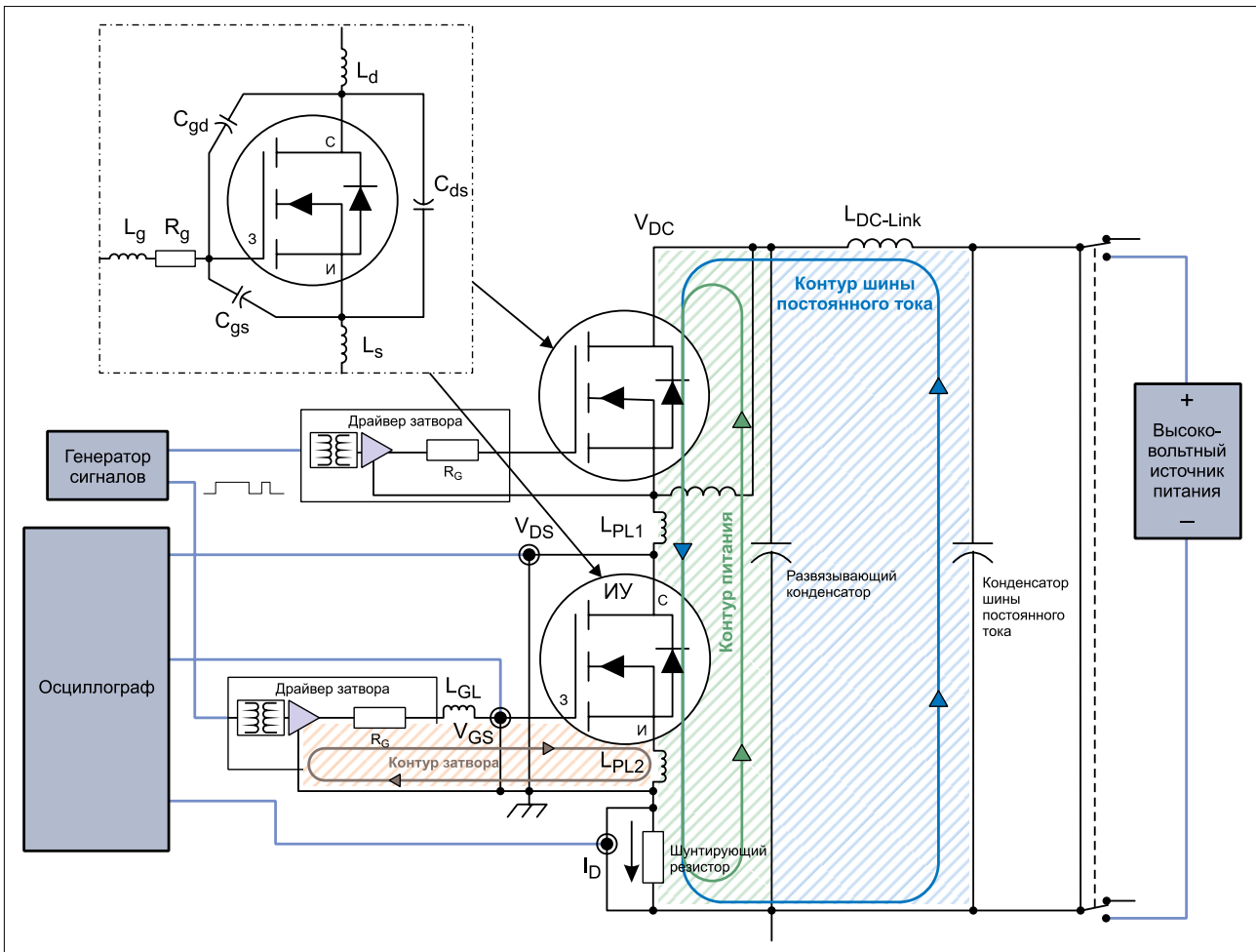


Рис. 2. Схема установки для испытаний методом двойных импульсов с паразитными элементами устройства и системы

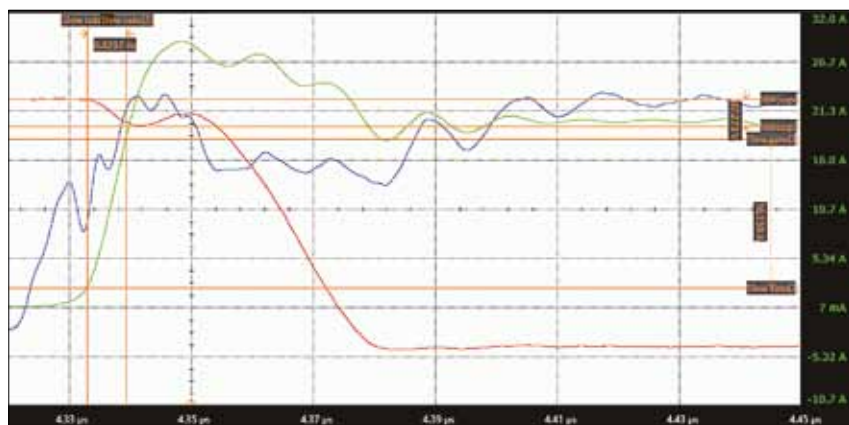


Рис. 3. Расчет паразитной индуктивности силового контура по результатам измерения:
 $L_{pl} = 87,27 \text{ В}/(16,16 \text{ А}/6,43 \text{ нс} = 35 \text{ нГн})$

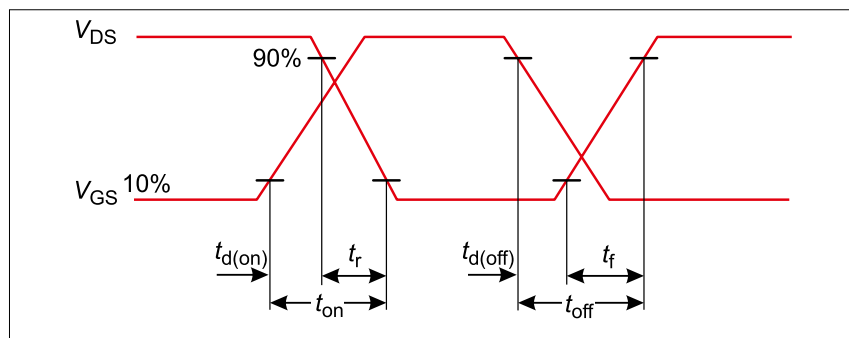


Рис. 4. Метод извлечения параметров переключения

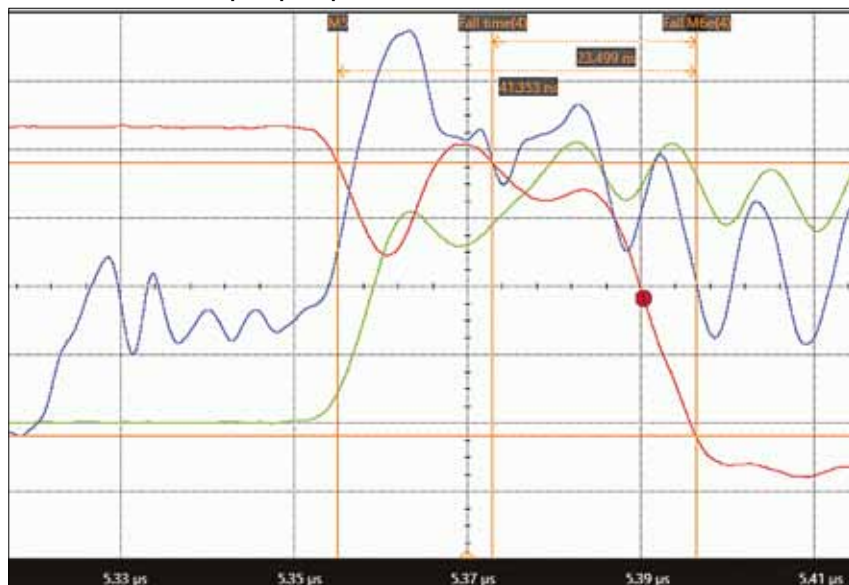


Рис. 5. Событие включения (V_{DS} – красный; I_D – зеленый; V_{GS} – синий)

теристики переключения, указанные в техническом описании. Таким образом, в технических описаниях указано много разных значений R_{GS} , 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°C .

Однако роль V_{GS} в обратном восстановлении – другая. В примере на рисунке 6 напряжение V_{GS} равно -4 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 (запертым MOSFET). Чуть ниже мы назовем причину, по которой указано лишь максимальное значение напряжения.

Последним условием тестирования является параметр di_T/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	$V_{GS} = -4 \text{ В}$, ширина импульсов t_p ограничена T_{Jmax}^*
t_{RR}	Время обратного восстановления	81 нс		$V_{GS} = -4 \text{ В}; I_{SD} = 50 \text{ А}; V_R = 800 \text{ В}; di_F/dt = 1000 \text{ А/мкс}; T_J = 175^\circ\text{C}^*$
Q_{RR}	Заряд обратного восстановления	879 нКл		
I_{RRM}	Ток обратного восстановления (пик.)	19 А		

* $V_{GSmax} = -4 \text{ В/19 В}$ 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 затвористок V_{GS} для управления MOSFET верхнего плеча.

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

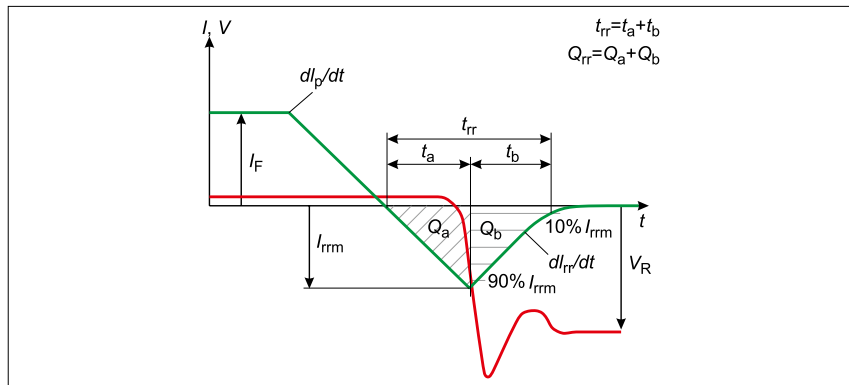


Рис. 6. Метод извлечения параметров обратного восстановления

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_{RRM} . 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. В последующих статьях от Keysight обсуждаются воспроизводимые и надежные результаты тестирования методом двойных импульсов. ▢