

## Измерительный комплекс для определения характеристик высоковольтных карбидокремниевых диодов Шоттки в импульсных режимах

В. Ф. Зотин, А. Ю. Дракин, С. Б. Рыбалка, А. А. Демидов, Е. А. Кульченков

*Разработан отечественный автоматизированный исследовательский измерительный комплекс, позволяющий определять значения токов, напряжений и мощности карбидокремниевых диодов Шоттки при подаче импульсов обратного напряжения с амплитудами от 400 до 1000 В. Исследовательский измерительный комплекс был протестирован на карбидокремниевых диодах Шоттки DDSH411A91 («ГРУППА КРЕМНЫЙ ЭЛ») и C3D1P7060Q (Cree/Wolfspeed) и позволил определить их максимальные значения скорости нарастания обратного напряжения  $dV/dt$  (877 В/нс и 683 В/нс). Также были определены максимальные значения скорости нарастания тока  $dI/dt$  для диодов DDSH411A91 (3,24 А/нс) и C3D1P7060Q (3,72 А/нс). Впервые установлено, что при подаче импульса обратного напряжения амплитудой 1000 В максимальные значения мгновенной полной мощности достигают 1419 ВА для диода DDSH411A91 и 1638 ВА для диода C3D1P7060Q.*

*Ключевые слова:* измерение электрических характеристик в импульсных режимах, карбид кремния, диод Шоттки.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-67-73

### Введение

В настоящее время прогресс в силовой электронике обусловлен разработкой и внедрением устройств на основе широкозонных полупроводников (карбида кремния (SiC), нитрида галлия (GaN) и др.) [1]. В частности, высоковольтные карбидокремниевые диоды Шоттки представляют собой новое поколение силовых полупроводниковых приборов, кото-

рые обладают максимальными значениями напряжения пробоя и минимальными токами утечки [1, 2]. Недавно было установлено, что одна из важных характеристик карбидокремниевых диодов Шоттки при работе в импульсном режиме, когда на диод подается импульс обратного напряжения – это скорость нарастания обратного напряжения  $dV/dt$ . Исследователями из фирмы Cree/Wolfspeed была впервые предложена и разработана установка [3] по исследованию стойкости карбидокремниевых диодов Шоттки к скорости нарастания обратного напряжения и установлено, что устройства с более низкими значениями  $dV/dt$  более подвержены отказу от больших пусковых токов [3, 4]. Анализ показал, что диоды Cree/Wolfspeed могут выдерживать скорость включения 75 В/нс и выключения 100 В/нс в течение более 100 тыс. циклов без пробоя [3, 4]. С учетом этих и других исследований, для производителей элементной базы появилось требование указывать стойкость к  $dV/dt$  в ка-

---

Зотин Виталий Федорович, доцент, к.т.н.  
Дракин Александр Юрьевич, доцент, к.т.н.  
Рыбалка Сергей Борисович, доцент, к.ф.-м.н.  
E-mail: sbrybalka@yandex.ru  
Демидов Андрей Александрович, профессор, д.ф.-м.н.  
Кульченков Евгений Александрович, ст. преподаватель.  
Брянский государственный технический университет.  
Россия, 241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, 7.

Статья поступила в редакцию 24 июня 2021 г.

---

© Зотин В. Ф., Дракин А. Ю., Рыбалка С. Б., Демидов А. А., Кульченков Е. А., 2021

честве критерия надежности высоковольтных карбидокремниевых диодов Шоттки и теперь ведущими мировыми производителями (Infineon, Cree/Wolfspeed) значения  $dV/dt$  к скорости нарастания обратного напряжения включаются в паспортные данные диодов [5, 6]. Так, например, для диода Cree E3D08065G (650 В) в паспорте значение  $dV/dt$  указывается 200 В/нс [5], а для диода Infineon IDWD10G120C5 (1200 В) значение  $dV/dt$  составляет 80 В/нс [6].

Помимо этого, необходимость создания отечественного автоматизированного исследовательского испытательного комплекса обусловлена началом серийного производства в России первых диодов Шоттки на основе карбида кремния (политип 4H-SiC) предприятием АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (г. Брянск) [7–9]. В то же время современное промышленное производство устройств силовой электроники переходит к использованию малогабаритных металлополимерных корпусов SOT (Small Outline Transistor), QFN (Quad Flat No-lead) и других [2, 3, 10]. В частности, для серийных отечественных высоковольтных карбидокремниевых диодов Шоттки нового поколения, изготавливаемых АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» в рамках программ импортозамещения, уже запущен процесс модернизации производства для корпусирования их в малогабаритные металлополимерные корпуса SOT и QFN типа [9].

Таким образом, целью настоящей работы являлась разработка автоматизированного исследовательского измерительного комплекса для определения электрических характеристик высоковольтных карбидокремниевых ди-

одов Шоттки при работе их в импульсном режиме при подаче импульсов обратного напряжения с амплитудой до 1000 В и тестирование его на современных карбидокремниевых диодах Шоттки в малогабаритных металлополимерных корпусах.

### Измерительный исследовательский комплекс и методы исследований

Разработанный автоматизированный исследовательский измерительный комплекс, макет которого был успешно протестирован ранее [7–9], был подвергнут модернизации с целью обеспечения возможности подачи импульсов обратного напряжения до 1000 В, а также возможности контроля тока, протекающего через испытуемые карбидокремниевые диоды Шоттки. Функциональные модули разработанного измерительного комплекса для определения импульсных электрических характеристик ( $dV/dt$  и  $dI/dt$ ) карбидокремниевых диодов Шоттки при подаче импульсов обратного напряжения показаны на рис. 1, а. Исследовательский измерительный комплекс состоит из следующих функциональных модулей:

- контроллера *Controller*;
- программируемого источника постоянного напряжения *VS1000*;
- источника питания *PS*;
- выходного каскада *Out-Stage*.

Конструктивно функциональные модули выполнены в виде незащищённых печатных плат, закреплённых на общем основании (см. рис. 1, б).

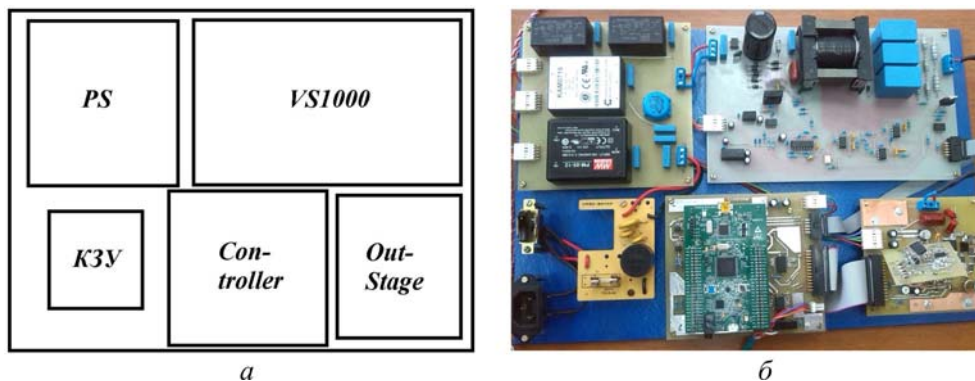


Рис. 1. (а) Функциональные модули макета автоматизированного комплекса для испытаний диодов Шоттки на основе карбида кремния к скорости нарастания обратного напряжения; (б) Фото автоматического испытательного комплекса для определения импульсных электрических характеристик ( $dV/dt$  и  $dI/dt$ ) для карбидокремниевых диодов Шоттки.

Источник питания **PS** с помощью дополнительного коммутационно-защитного узла **K3V** подключается к сети электропитания переменного тока. Контроллер **Controller** с помощью преобразователя интерфейсов RS485/USB 2.0 подключается к персональной ЭВМ.

Задаваемая скорость нарастания напряжения  $dV/dt$  зависит от параметров испытуемого диода и контролируется внешним цифровым осциллографом, подключаемым к модулю **Out-Stage**. Критерием пробоя испытуемого диода является уменьшение обратного напряжения на начальном этапе формирования импульса. При этом пороговое значение напряжения может регулироваться. Фиксация пробоя приводит к прекращению подачи импульсов обратного напряжения. К модулю **Out-Stage** возможно подключение цифрового осциллографа для контроля тока через испытуемый диод. Электропитание измерительного комплекса осуществляется от сети переменного напряжения  $220 \pm 22$  В, частотой  $50 \pm 1$  Гц. Исследовательский измерительный комплекс обеспечивает проведение испытаний

диода Шоттки путём формирования серии импульсов обратного напряжения со следующими параметрами: диапазон задания амплитуды напряжения – (400–1000) В; диапазон задания скорости нарастания напряжения – (40–250) В/нс; частота следования импульсов напряжения – 1, 2, 5, 10 Гц; количество формируемых импульсов напряжения – (1–100 000).

Основные функции макета реализует модуль **Out-Stage** (выходной каскад), принципиальная схема которого приведена на рис. 2.

Испытуемый диод устанавливается в разъём XS1. Импульс обратного напряжения формируется при включении транзистора VT2 с помощью предварительно заряженного конденсатора C8 по сигналу контроллера **PULSE**. Амплитуда импульса напряжения задаётся напряжением **UR** с выхода модуля **VS1000**, которое программируется в пределах от 400 В до 1000 В. Высокая скорость нарастания напряжения (более 250 В/нс) обеспечивается микросхемой драйвера DA1 с выходным током до 9 А. Узел определения состояния пробоя испытуемого диода содержит компаратор DA3, буфер DD1, одновибратор DD2.1 и RS-триггер DD2.2.

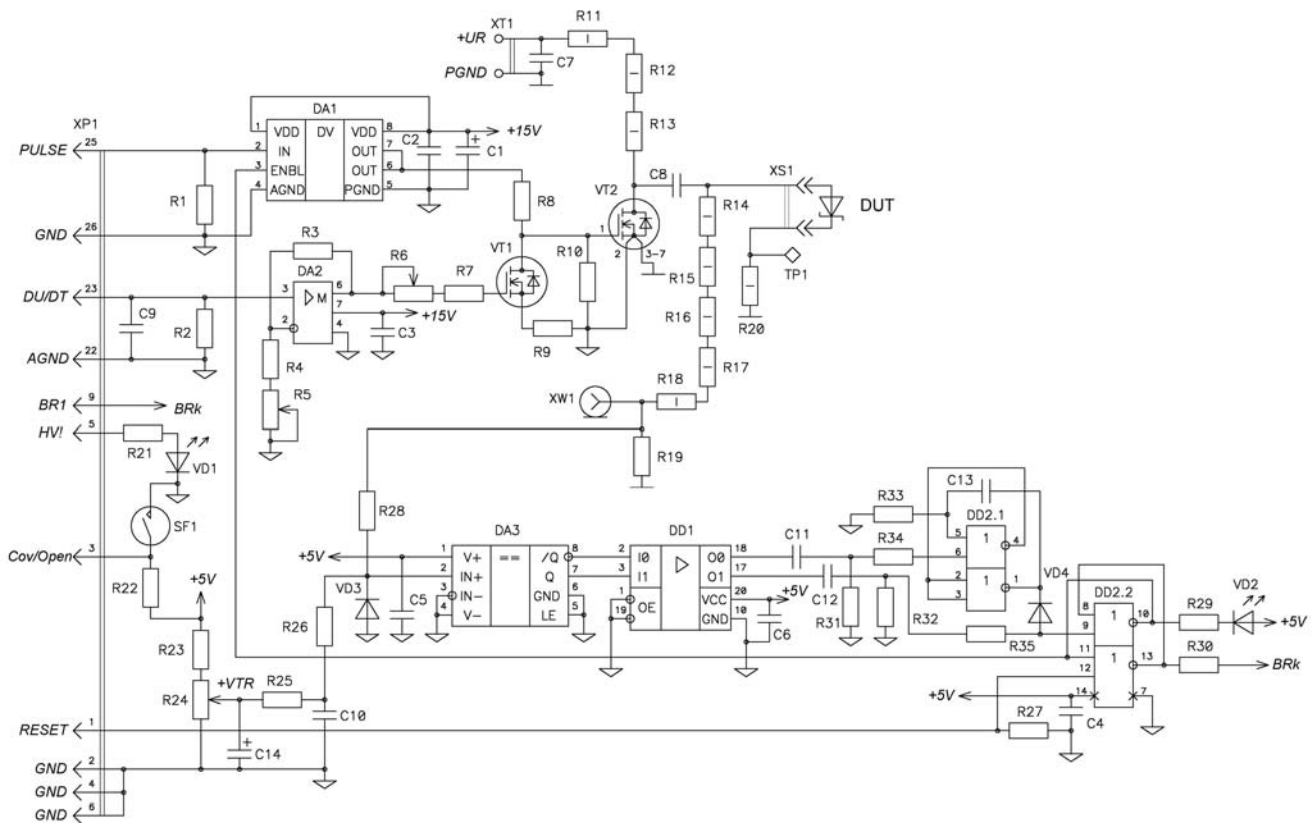


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема модуля выходного каскада (**Out-Stage**) исследовательского измерительного комплекса для определения характеристик ( $dV/dt$  и  $dI/dt$ ) карбидкремниевых диодов Шоттки при подаче импульса обратного напряжения.

Компаратор фиксирует превышение обратного напряжения уровня, заданного резистором R24. При пробое диода длительность выходных сигналов компаратора не превышает 100 нс. Одновибратор формирует «окно» длительностью около 100 нс для восприятия RS-триггером сигнала, связанного с падением обратного напряжения ниже порогового значения  $V_{TR}$ . С помощью дополнительного транзистора VT1, шунтирующего цепь затвора транзистора VT2, обеспечивается управление скоростью нарастания обратного напряжения. Управляющий сигнал  $dV/dt$  с выхода ЦАП контроллера масштабируется усилителем DA2. Его увеличение приводит к уменьшению скорости нарастания обратного напряжения на испытуемом диоде. Управление процессом испытания диодов Шоттки реализуется функциональным модулем **Controller** на базе отладочного устройства STM32F4DISCOVERY с 32-рядным микроконтроллером семейства STM32. На рис. 1, б показано фото автоматического испытательного комплекса для определения импульсных электрических характеристик карбидокремниевых диодов Шоттки.

Основные технические характеристики автоматического исследовательского измерительного комплекса для определения импульсных электрических характеристик карбидокремниевых диодов Шоттки обобщены в таблице ниже.

Таблица

*Основные технические характеристики автоматического исследовательского измерительного комплекса для определения импульсных электрических характеристик карбидокремниевых диодов Шоттки*

Диапазон задания амплитуды напряжения	400–1000 В
Дискретность задания амплитуды напряжения	не более 1 В
Погрешность задания амплитуды напряжения	не более $\pm 6\%$
Диапазон задания скорости нарастания напряжения	40–250 В/нс
Частота следования импульсов напряжения	1, 2, 5, 10 Гц
Погрешность задания частоты следования импульсов	не более $\pm 5\%$
Количество формируемых импульсов напряжения	1–100 000
Электропитание	$220 \pm 22$ В
Потребляемая мощность	не более 100 ВА

Для регистрации сигналов напряжения и тока использовался осциллограф Tektronix MDO3102 (полоса пропускания 1 ГГц, частота обновления 5 Гвыб/с). Измерение напряжения проводилось с помощью осциллографа, подключенного к резистору R19 (XW1 на рис. 2). Измерение тока проходящего через диод выполнялось с помощью осциллографа, подключенного к резистору R20=1 Ом (XW1 на рис. 2), включенному последовательно с испытуемым диодом. Фронт обратного напряжения на испытуемом диоде формируется включением карбидокремниевых транзистора VT2. Малое время разгона обеспечено за счет заряда входной емкости транзистора VT2 с использованием тока лавинного пробоя транзистора VT1. Процесс регулирования параметра  $dV/dt$  реализован усилителем DA2. Исследуемые диоды Шоттки (DUT) были подключены к разъему, обозначенному XS1 на рис. 2.

## Результаты и обсуждение

Для тестирования автоматизированного исследовательского измерительного комплекса были выбраны карбидокремниевые 4H-SiC диоды Шоттки в малогабаритных металлополимерных корпусах DDSH411A91 (корпус SOT-89, «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ») и C3D1P7060Q (корпус QFN 3.3, Cree/Wolfspeed). Предварительно, автоматизированный исследовательский комплекс был откалиброван управляющим сигналом по амплитуде импульса обратного напряжения (амплитуда напряжения 1000 В,  $dV/dt = 150$  В/нс) без диода (черная кривая, показанная на рис. 3). Максимальные значения  $dV/dt$ , а также  $dI/dt$  для исследуемого диода были получены по наклону линейной части осциллограммы для формы сигнала напряжения и тока после первого максимума на спаде кривой (например, на рис. 3 интервалы  $dV$ , а также интервалы  $dI$  для определения значений  $dV/dt$  и  $dI/dt$  выбирались из интервала времени  $dt$  примерно от 14 до 15,5 нс). Рассчитанные значения  $dV/dt$  для отечественного карбидокремниевых диода Шоттки DDSH411A91 составили 877 В/нс и для зарубежного диода Шоттки C3D1P7060Q значения  $dV/dt$  составили 683 В/нс. Таким образом, по значениям  $dV/dt$  показатели отечественного и зарубежного диодов весьма близ-

ки, что свидетельствует о конкурентоспособности по этому показателю отечественного карбидокремниевых диода Шоттки. Полученные значения  $dV/dt$  превышают типичные для карбидокремниевых зарубежных диодов 80–200 В/нс [5, 6] и близки к полученным в исследованиях диодов фирмы Cree/Wolfspeed (650–800 В/нс) [11, 12]. Стоит отметить, что

наблюдаемые значения максимальной амплитуды обратных напряжений, проходящих через диоды (рис. 3), заметно превышают значения напряжения пробоя для данных диодов в статическом режиме (1000–1200 В), в частности 1264 В для диода DDSH411A91 и 1380 В для C3D1P7060Q, тем не менее пробоя диодов при таком импульсном режиме не наблюдается.

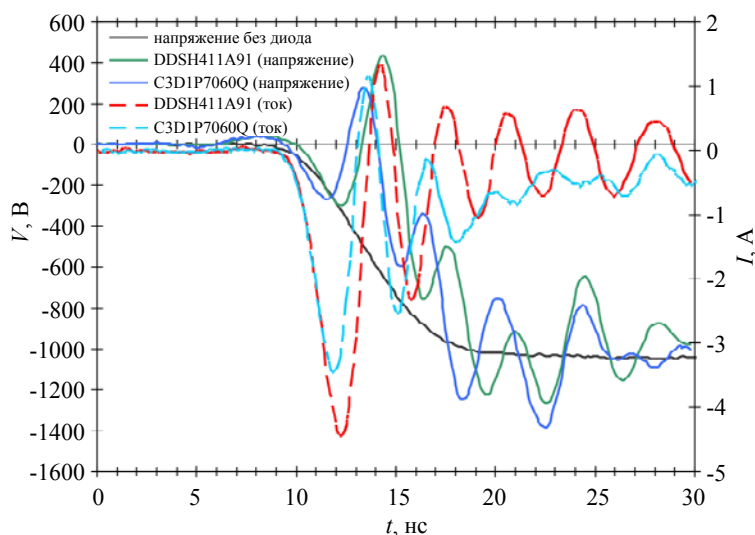


Рис. 3. Форма обратного напряжения и тока с максимальной амплитудой импульса обратного напряжения 1000 В для карбидокремниевых диодов Шоттки DDSH411A91 (SOT-89, «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ») и C3D1P7060Q (QFN 3.3, Cree/Wolfspeed).

С другой стороны, помимо параметра  $dV/dt$ , для карбидокремниевых диодов Шоттки в импульсном режиме также важна еще одна характеристика –  $dI/dt$ , которая описывает устойчивость диодов к процессу нарастания тока в импульсном режиме при подаче обратного напряжения на диод.

Оказалось, что определенные из рис. 3 значения  $dI/dt$  для отечественного карбидокремниевых диода Шоттки в малогабаритном металлополимерном корпусе DDSH411A91 составили 3,24 А/нс. Аналогично, для зарубежного диода Шоттки в малогабаритном металлополимерном корпусе C3D1P7060Q (QFN 3.3, Cree/Wolfspeed) значения  $dI/dt$  оказались несколько больше и составили 3,72 А/нс. Тем не менее, можно отметить что по значениям  $dI/dt$  показатели отечественного и зарубежного диодов достаточно близки.

Также для исследованных диодов зафиксированы существенные значения максимальной амплитуды обратного тока (рис. 3) от 4,44 А (DDSH411A91) и 2,47 А (C3D1P7060Q), которые на несколько порядков превышают типовой предел тока для безимпульсного статиче-

ского обратного режима работы диодов (15–200 мкА).

С учетом обнаруженных зависимостей от времени тока и напряжений, проходящих через карбидокремниевые диоды Шоттки, представляет интерес рассмотреть зависимость мощности тока при подаче импульса обратного напряжения от времени. Используя полученные данные (см. рис. 3) была рассчитана мгновенная полная мощность через диод как произведение силы тока  $I$  на напряжение  $V$  в одни и те же моменты времени. Оказалось, что максимальные значения мгновенной полной мощности равны 1419 ВА для диода DDSH411A91 (SOT-89) и 1638 ВА для диода C3D1P7060Q (QFN 3.3). Таким образом, впервые установлено, что при подаче импульса обратного напряжения регистрируются значительные величины мощностей токов, проходящих через диоды.

### Заключение

Разработан отечественный автоматизированный исследовательский измерительный

комплекс для определения параметров токов, напряжений и мощности карбидокремниевых диодов Шоттки при подаче через них импульсов обратного напряжения с амплитудами от 400 до 1000 В. Проведено тестирование исследовательского измерительного комплекса на карбидокремниевых диодах Шоттки в малогабаритных металлополимерных корпусах. Установлено, что максимальные значения  $dV/dt$  для отечественного и зарубежного карбидокремниевых диодов Шоттки диодов весьма близки – 877 В/нс для отечественного DDSH411A91 (SOT-89, «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ») и 683 В/нс для зарубежного C3D1P7060Q (QFN 3.3, Cree/Wolfspeed). Также определены максимальные значения скорости нарастания тока  $dI/dt$ .

Таким образом, разработанный отечественный автоматизированный исследовательский измерительный комплекс, в отличие от зарубежных аналогов, позволяет определять не только скорости нарастания напряжений ( $dV/dt$ ), но и токов ( $dI/dt$ ), а также полной мощности для карбидокремниевых диодов Шоттки при подаче на них импульсов обратного напряжения с амплитудами от 400 до 1000 В.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства кремниевых и карбидокремниевых изделий микроэлектронной техники в малогабаритных металлополимерных корпусных исполнениях типа SOT, SO и QFN» (соглашение от 29 ноября 2019 г. № 075-11-2019-035) в организации головного исполнителя НИОКТР ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Baliga B. J. Wide Bandgap Semiconductor Power Devices: Materials, Physics, Design, and Applications – Cambridge: Woodhead Publishing–Elsevier, 2019.
2. Kimoto T., Cooper J. A. Fundamentals of Silicon Carbide Technology. Growth, Characterization, Devices, and Applications – New York: Wiley–IEEE Press, 2014.
3. Barbieri T. Assessing next-generation discretes: Measuring SiC Schottky diode ruggedness with a high voltage pulse generator [Электронный ресурс] / Wolfspeed, A Cree Company, 11/05/2015. [сайт] URL: [https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/855/product/0/measuring\\_sic\\_schottky\\_diode\\_ruggedness\\_with\\_a\\_high\\_voltage\\_pulse\\_generator.pdf](https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/855/product/0/measuring_sic_schottky_diode_ruggedness_with_a_high_voltage_pulse_generator.pdf)
4. Карташов Е., Лебедев А. // Силовая электроника. 2016. № 2. С. 18.
5. 5<sup>th</sup> Generation CoolSiC™ 1200V Schottky Diode, IDWD10G120C5 2019-01-30 V. 2.0, Infineon Technologies AG. [Электронный ресурс] URL: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IDWD10G120C5-DataSheet-v02\\_00-EN.pdf?fileId=5546d462689a790c016933d53cbf5486](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IDWD10G120C5-DataSheet-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d462689a790c016933d53cbf5486)
6. Cree E3D08065G Silicon Carbide Schottky Diode E-Series Automotive, E3D08065G Rev. 1, 10-2020. [Электронный ресурс] URL: <https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/1847/product/0/e3d08065g.pdf>
7. Рыбалка С. Б., Демидов А. А., Кульченко Е. А., Дракин А. Ю. // Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. 2018. Т. 50. № 4. С. 460.
8. Громов В., Брюхно Н., Демидов А., Дракин А., Зотин В., Кульченко Е., Рыбалка С. // Силовая электроника. 2018. № 2. С. 10.
9. Sedykh S. V., Rybalka S. B., Drakin A. Yu., Demidov A. A., Kulchenkov E. A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1410. P. 012195.
10. Lu D., Wong C. P. Materials for advanced packaging – Cham: Springer International Publishing, 2017.
11. Wang G., Van Brunt E., Barbieri T., Hull B., Richmond J., Palmour J. / Proc. PCIM Europe 2017 (Nuremberg, 2017). P. 870–875.
12. Van Brunt E., Wang G., Liu J., Pala V., Hull B., Richmond J., Palmour J. / Proc. 28th Int. Symp. Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD) (Prague, 2016). P. 67–70.

## Measuring complex for determining the characteristics of high-voltage silicon carbide Schottky diodes in impulse modes

V. F. Zotin, A. Yu. Drakin, S. B. Rybalka, A. A. Demidov, and E. A. Kulchenkov

Bryansk State Technical University  
7 50 let Oktyabrya blvd., Bryansk, 241035, Russia  
E-mail: sbrybalka@yandex.ru

Received June 24, 2021

*This paper describes a developed automated research measuring complex that allows one to determine the parameters of currents, voltages and power of silicon carbide Schottky diodes when applied reverse voltage impulses with amplitudes from 400 to 1000 V. The research measuring complex was tested on DDSH411A91 («GRUPPA KREMNY EL») and C3D1P7060Q (Cree/Wolfspeed) silicon carbide Schottky diodes and allows to determine their maximum values of the rate of rise of reverse voltage  $dV/dt$  (877 V/ns and 683 V/ns). Also, the maximum values of the current rise rate  $dI/dt$  were determined for DDSH411A91 (3.24 A/ns) and C3D1P7060Q (3.72 A/ns) diodes. For the first time it was established that, when a reverse voltage impulse with an amplitude of 1000 V is applied, the maximum values of instantaneous fullpower reach 1419 VA for the DDSH411A91 diode and 1638 VA for the C3D1P7060Q diode.*

*Keywords:* measurements in electric characteristics in impulse modes, silicon carbide, Schottky diode.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-6-67-73

### REFERENCES

1. B. J. Baliga, *Wide Bandgap Semiconductor Power Devices: Materials, Physics, Design, and Applications* (Woodhead Publishing–Elsevier, Cambridge, 2019).
2. T. Kimoto and J. A. Cooper, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology. Growth, Characterization, Devices, and Applications* (Wiley–IEEE Press, New York, 2014).
3. T. Barbieri. *Assessing next-generation discretes: Measuring SiC Schottky diode ruggedness with a high voltage pulse generator* [electronic resource] / Wolfspeed, A Cree Company, 11/05/2015 [site]. URL: [https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/855/product/0/measuring\\_sic\\_schottky\\_diode\\_ruggedness\\_with\\_a\\_high\\_voltage\\_pulse\\_generator.pdf](https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/855/product/0/measuring_sic_schottky_diode_ruggedness_with_a_high_voltage_pulse_generator.pdf)
4. E. Kartashov and A. Lebedev, *Silovaya Elektronika*, No. 2, 18 (2016).
5. 5<sup>th</sup> Generation CoolSiC™ 1200V Schottky Diode, IDWD10G120C5 2019-01-30 V. 2.0, Infineon Technologies AG. [electronic resource] URL: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IDWD10G120C5-DataSheet-v02\\_00-EN.pdf?fileId=5546d462689a790c016933d53cbf5486](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IDWD10G120C5-DataSheet-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d462689a790c016933d53cbf5486)
6. Cree E3D08065G Silicon Carbide Schottky Diode E-Series Automotive, E3D08065G Rev. 1, 10-2020. [electronic resource] URL: <https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/1847/product/0/e3d08065g.pdf>
7. S. B. Rybalka, A. A. Demidov, E. A. Kulchenkov, and A. Yu. Drakin, *Belgorod State University Scientific Bulletin: Mathematics & Physics* **50** (4), 460 (2018).
8. V. Gromov, N. Bryukhno, A. Demidov, A. Drakin, V. Zotin, E. Kulchenkov, and S. Rybalka, *Silovaya Elektronika*, No. 2, 10 (2018).
9. S. V. Sedykh, S. B. Rybalka, A. Yu. Drakin, A. A. Demidov, and E. A. Kulchenkov. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1410**, 012195 (2019).
10. D. Lu and C. P. Wong, *Materials for advanced packaging* (Springer International Publishing, Cham, 2017).
11. G. Wang, E. Van Brunt, T. Barbieri, B. Hull, J. Richmond, and J. Palmour, in *Proc. PCIM Europe 2017* (Nuremberg, 2017), pp. 870–875.
12. E. Van Brunt, G. Wang, J. Liu, V. Pala, B. Hull, J. Richmond, and J. Palmour, in *Proc. 28th Int. Symp. Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* (Prague, 2016), pp. 67–70.