

ТЕМАТИЧЕСКОЕ
ПРИЛОЖЕНИЕ
К ЖУРНАЛУ
КОМПОНЕНТЫ
И ТЕХНОЛОГИИ

№ 2'2018
АПРЕЛЬ

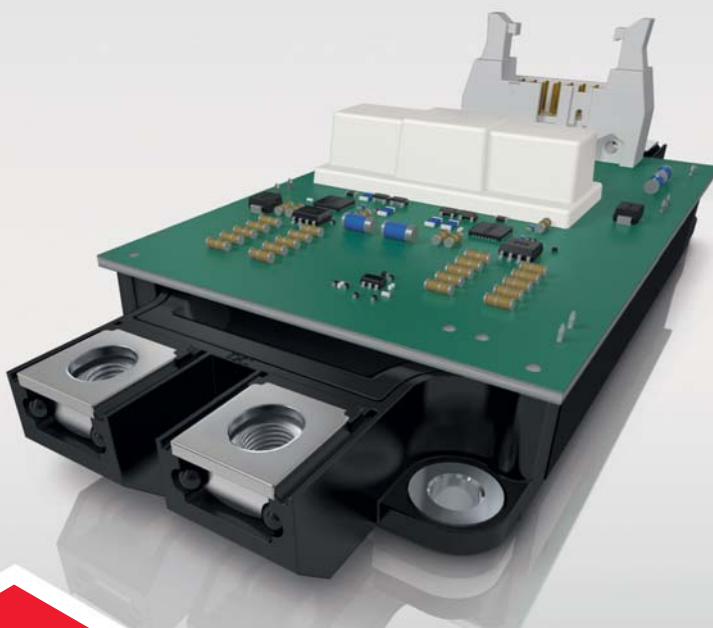
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ISSN 2079-9322

SEMİKRON
innovation+service

SEMiX3 Press Fit / SKYPER 12

новое поколение модулей IGBT и цифровых драйверов
с соединением методом прессовой посадки



Модули IGBT SEMiX3 Press Fit

Рабочее напряжение — 1200 и 1700 В

Номинальный ток — 300, 450, 600 А

Новейшее поколение кристаллов Trench 4, CAL 4HD

Опционально — поставка модулей с нанесенной термопастой с изменяемым фазовым состоянием

Цифровой драйвер SKYPER 12

Цифровой способ передачи данных по дифференциальному каналу

Все базовые виды защит

Высокие показатели EMC

Первая на рынке сборка «модуль IGBT-драйвер», сертифицированная производителем



Моторные
привода



Энергетика

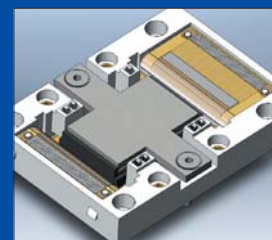


Системы
электропитания



Городской
транспорт

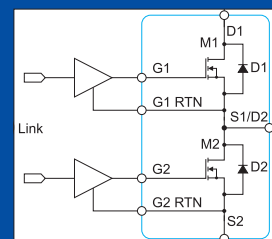
www.semikron.com/contact



Концепция мощного
SiC-модуля
со сверхнизкой
коммутационной
индуктивностью



Обзор IGBT-драйверов
AgileSwitch



Особенности проектирования
преобразователей
с SiC-модулями Cree



Полупроводниковые
резонансные преобразователи
для солнечных электростанций

SEMİKRON

197101, Санкт-Петербург,
ул. Большая Пушкарская, д. 41
Тел. +7 (812) 232-9825

E-mail: andrey.kolpakov@semikron.com

PT Electronics
www.ptelectronics.ru

Санкт-Петербург
Тел. +7 (812) 324-63-50

E-mail: power@ptelectronics.ru

Москва

Тел. +7 (495) 517-92-56

E-mail: moscow@ptelectronics.ru

Главный редактор
Павел Правосудов pavel@fsmedia.ru

Зам. главного редактора
Анна Соснина a.sosnina@mtu-net.ru

Выпускающий редактор
Наталья Новикова natalia.novikova@fsmedia.ru

Технический консультант
Андрей Колпаков

Новостной редактор
Наталья Новикова natalia.novikova@fsmedia.ru

Литературный редактор
Екатерина Трофимова

Дизайн и верстка
Дмитрий Никаноров dmitry.nikanorov@fsmedia.ru

Отдел рекламы
Ольга Зайцева olga_z@fsmedia.ru
Ирина Миленина irina@fsmedia.ru

Отдел подписки
Наталья Виноградова podpiska@fsmedia.ru

Москва
105120, Москва,
Нижняя Сыромятническая ул., 10, стр. 4, офис 218
Тел./факс: (495) 987-3720

Санкт-Петербург
197101, Санкт-Петербург,
Петроградская наб., 34, лит. Б
Тел. (812) 438-1538
Факс (812) 346-0665
E-mail: compitech@fsmedia.ru
www.power-e.ru

Республика Беларусь
«ПремьерЭлектрик»
Минск, ул. Маяковского, 115, 7-й этаж
Тел./факс: (10-37517) 297-3350, 297-3362
E-mail: murom@premier-electric.com

Подписной индекс
Каталог агентства «Роспечать» 20370
Агентство KSS 27039
Тел. в Киеве: (044) 270-6220, 270-6222

Подписано в печать 10.04.2018
Тираж 4000 экз.
Свободная цена

Журнал «Силовая электроника» зарегистрирован
Федеральной службой по надзору в сфере связи
и массовых коммуникаций. Свидетельство
о регистрации средства массовой информации
ПИ № ТУ 78 - 01937 от 17.10.2016 г.

Учредитель: ЗАО «Медиа Групп Файнстрит»
Издатель, редакция: ООО «Медиа КиТ»
197101, г. Санкт-Петербург,
Петроградская наб., 34Б
Отпечатано в типографии «Принт24»
192102, Санкт-Петербург,
ул. Самойловой, д.5, литер В

Редакция не несет ответственности за информацию,
приведенную в рекламных материалах.
Полное или частичное воспроизведение
материалов допускается с разрешения
ООО «Медиа КиТ».

Журнал включен в Российский индекс научного
цитирования (РИНЦ).

На сайте Научной электронной библиотеки
eLIBRARY.RU (www.elibrary.ru) доступны полные
тексты статей. Статьи из номеров журнала
текущего года предоставляются на платной основе.

В номере:

Силовая элементная база

Др. Арне Альбертсен

Алюминиевые электролитические конденсаторы
с проводящим полимером4

**Николай Брюхно, Владимир Громов, Андрей Демидов,
Александр Дракин, Виталий Зотин, Евгений Кульченков, Сергей Рыбалка**

Исследование стойкости SiC-диодов Шоттки
ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»
к скорости нарастания обратного напряжения¹10

**Петер Бекедаль, Свен Бетоу, Андреас Мол,
Мартин Роеблиц, Матиас Спенг (Matthias Spang)**

Перевод и комментарии: Андрей Колпаков
Концепция мощного SiC-модуля
со сверхнизкой коммутационной индуктивностью14

Вячеслав Гавриков, Олег Антонов

Обзор IGBT-драйверов AgileSwitch.20

Виктор Толстопятов, Нильс Солтау, Ойген Виснер, Кенджи Хатори

Полный карбидкремниевый MOSFET-модуль на 3,3 кВ:
новый класс эффективности тяговых инверторов26

Источники питания

Норик Петросян

Влияние входного фильтра на характеристики импульсных
преобразователей постоянного напряжения30

Переводчик: Валерия Смирнова

Особенности проектирования преобразователей
с SiC-модулями Cree.
Часть 1. Оценка влияния паразитных элементов34

Фабио Бручи, Давид Чиола

Перевод: Владимир Рентюк
IGBT-модули. Практическое исследование трехуровневых
инверторов, выполненных по гибридной технологии
с использованием SiC- и Si-транзисторов42

Системы индукционного нагрева

Юрий Зинин, Дарья Мамаева, Юрий Ройзман, Владимир Куземский

Транзисторный преобразователь частоты «Петра-0141»
мощностью 250–800 кВт индукционных плавильных установок
типа ИСТ для теплообменной станции «Петра-0395»46

Editor-in-chief

Pavel Pravosudov pavel@fsmedia.ru

Managing editor

Natalia Novikova natalia.novikova@fsmedia.ru

Technical editor

Andrey Kolpakov

News Editor

Natalia Novikova natalia.novikova@fsmedia.ru

Literary editor

Ekaterina Trofimova

Design and layout

Dmitry Nikanorov dmitry.nikanorov@fsmedia.ru

Advertising department

Olga Zaytseva olga_z@fsmedia.ru
Irina Milenina irina@fsmedia.ru

Subscription department

Natalia Vinogradova podpiska@fsmedia.ru

Editorial office

105120, Russia, Moscow,
Nizhnaya Syromatnicheskaya str., 10, str 4, of. 218
Tel./Fax: (495) 775-1676

197101, Russia, St. Petersburg,
Petrogradskaya Emb., b. 34 "B"
Tel. (812) 438-1538
Fax (812) 346-0665
E-mail: compitech@fsmedia.ru
www.power-e.ru/eng.php

Representative office in Belarus

Minsk, Premier Electric
Tel.: (10-37517) 297-3350, 297-3362
E-mail: murom@premier-electric.com

KSS agency

Tel. in Kiev: (044) 270-6220, 270-6222
Subscription index 27039

Применение

Геннадий Белов, Александр Серебрянников, Анфисия Павлова

Полупроводниковые резонансные преобразователи для солнечных электростанций¹ 55

Софт

Сергей Герман-Галкин

Школа MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники и электромеханики в среде Matlab+Simulink. Урок 25. Мехатронная система с двумя генераторами в общей электрической сети переменного тока. 68

Технологии

Евгений Ларин, Сергей Хардилов

Опыт разработки и эксплуатации установок вакуумной заливки высоковольтных трансформаторов 74

Дмитрий Титушкин, Алексей Сурма, Александр Ставцев, Сергей Матюхин

Применение технологии синтеринга для снижения потока отказов при эксплуатации мощных тиристорov. 78

Список рекламы

Fuji Electric	2-я обл.
Microchip Limited	13
PT Electronics	4-я обл.
ЛЕМ Россия, ООО.....	19
ЛИГРА, ООО	19
Макро групп, ООО.....	41
Платан Компонентс, ЗАО.....	9
Протон-Электротекс ТД, АО	54
СЕМИКРОН, ООО	1-я обл.
Силовая Электроника, ООО	45
Симметрон, ЗАО.....	29
Элеконд, ОАО	9
Электровыпрямитель, ОАО.....	1-я стр.
Выставка "ChipExpo"	67
Выставка «Радиоэлектроника и приборостроение»	53
Выставка «Силовая Электроника»	3-я обл.
Выставка «Энергетика. Электротехника»	41
МикроЭМ	25

Исследование стойкости SiC-диодов Шоттки ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»

к скорости нарастания обратного напряжения¹

Проведено экспериментальное исследование влияния параметра dV/dt на пробой SiC-диодов Шоттки производства ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» при подаче импульса обратного напряжения. Исследование проведено с помощью разработанного отечественного тестера, позволяющего генерировать импульсы с величиной $dV/dt = 50\text{--}200$ В/нс. Установлено, что серийно выпускаемые и вновь создаваемые SiC-диоды Шоттки ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» работоспособны при dV/dt не менее 130 В/нс.

Николай Брюхно

niko@sitsemi.ru

Владимир Громов

gromov@sitsemi.ru

Андрей Демидов

demandr@yandex.ru

Александр Дракин

ada108@yandex.ru

Виталий Зотин

v.f.zotin@gmail.com

Евгений Кульченков

ewgeniy2000@mail.ru

Сергей Рыбалка

sbrybalka@yandex.ru

Развитие силовой электроники сопровождается внедрением новых технологий, способных повысить эффективность и надежность работы преобразовательных устройств. В ближайшие годы следует ожидать расширения применения и производства приборов на основе материалов с большой шириной запрещенной зоны, в первую очередь на основе карбида кремния политипа 4H (4H-SiC). Карбид кремния обладает уникальным для применения в приборах силовой электроники сочетанием свойств: высокой теплопроводностью, высокими пробивными характеристиками, а также значительной радиационной и термической стабильностью [1, 2]. Создание SiC-приборов позволило значительно улучшить характеристики корректоров коэффициента мощности, инверторов приводов, источников питания и других устройств.

Одними из важных компонентов, используемых в силовой электронике, являются SiC-диоды Шоттки. Такие диоды на основе 4H-SiC уже несколько лет разрабатываются и серийно выпускаются на предприятии ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (г. Брянск). Актуальной проблемой на пути еще более широкого применения SiC-диодов Шоттки представляется ограничение по максимальной величине параметра dV/dt при подаче импульса обратного напряжения [3–5]. Стойкость SiC-диодов Шоттки к воздействию dV/dt — одно из требований, устанавливающих ограничение скорости переключения в режиме жесткой коммутации. Установлено, что диоды с низкой стойкостью к dV/dt более подвержены отказам при воздействии больших пусковых токов [4, 5].

В настоящий момент число работ, в которых обсуждается эффект dV/dt в SiC-диодах Шоттки, весьма ограничено и представлено в основном исследо-

ваниями диодов Infineon Technologies [3], Wolfspeed [4, 5] и ROHM [6]. Например, исследование SiC-диодов Infineon показало, что для диодов с пробивным напряжением 600 В величина $dV/dt \approx 90$ В/нс, а с напряжением 1200 В $dV/dt \approx 120$ В/нс [3]. Для диодов Wolfspeed установлено, что при подаче импульса обратного напряжения $V = 800$ В для диода C3D03060A $dV/dt = 295$ В/нс, а при $V = 1000$ В для диода C4D10120A параметр $dV/dt = 490$ В/нс [4, 5]. Фирма Rohm приводит данные о том, что ее диоды в течение всего срока службы выдерживают dV/dt более 50 В/нс [6]. Недавно было продемонстрировано, что SiC-диоды Шоттки Wolfspeed нового поколения могут устойчиво работать без отказов при значениях dV/dt до 400 В/нс, при этом увеличение dV/dt до 650–800 В/нс приводило в ряде случаев к отказам [7, 8].

Об аналогичных исследованиях SiC-диодов Шоттки, выпускаемых отечественными производителями, к настоящему моменту в литературе не сообщалось. Поэтому целью данной работы являлось исследование стойкости SiC-диодов Шоттки производства ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» к скорости нарастания обратного напряжения при помощи разработанного тестера, способного генерировать импульсы с величиной $dV/dt = 50\text{--}200$ В/нс при амплитуде импульса обратного напряжения $V = 300\text{--}900$ В.

Тестер для исследования стойкости SiC-диодов Шоттки к скорости нарастания обратного напряжения

Оценка стойкости SiC-диодов Шоттки к параметру dV/dt требует формирования высоковольтных

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, задание № 8.1729.2017/4.6.

импульсов с высокой скоростью нарастания обратного напряжения. Для решения этой задачи был разработан измерительный тестер, показанный на рис. 1.

На рис. 2 представлена схема измерительной части разработанного тестера, позволяющего исследовать стойкость SiC-диодов Шоттки к параметру dV/dt в диапазоне 50–200 В/нс при $V = 300–900$ В. Фронт импульса обратного напряжения формируется включением SiC-транзистора VT2. Малая длительность фронта импульса обеспечивается зарядом входной емкости транзистора VT2 током лавинного пробоя транзистора VT1. Регулирование параметра dV/dt осуществляется резистором R21.

Результаты исследования стойкости SiC-диодов Шоттки

Анализ осциллограмм напряжения и тока проводился при помощи осциллографа Hantek DSO5102P (полоса пропускания 100 МГц, частота обновления 1 Гвыб/с). Сопротивление токоусъемного резистора $R = 1$ Ом. Амплитуда импульса обратного напряжения пошагово повышалась от начального значения $V = 300$ В до 900 В. При испытании SiC-диодов Шоттки импульсы напряжения подавались как однократные, так и сериями по 100, 1000 и 10 000 импульсов. Для проведения исследования диоды производства ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» подбирались с разным корпусным исполнением и отличающимися основными характеристиками. Для верификации полученных результатов предварительно была проведена оценка стойкости к dV/dt SiC-диодов Wolfspeed, что подтвердило основные выводы работы [4].

Результаты проведенного экспериментального исследования стойкости SiC-диодов Шоттки к скорости нарастания обратного напряжения показаны на рис. 3–6. В правом нижнем углу на представленных рисунках выведены данные о величинах dV и dt для каждого исследованного диода, что делает процесс определения параметра

dV/dt проще и точнее. Результат определения величины dV/dt указан в подписи к каждому рисунку. Видно, что каждый из исследованных SiC-диодов Шоттки оказался работоспособным после воздействия сформированного тестером импульса. Зафиксированные отличия форм осциллограмм после завершения однократного импульса в основном обусловлены разным корпусным исполнением диодов ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ».

Результаты определения параметра dV/dt для исследованных SiC-диодов Шоттки приведены в таблице.

Таким образом, стойкость SiC-диодов Шоттки ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» к скорости нарастания обратного напряжения сравнима со стойкостью диодов фирм Infineon Technologies, ROHM и Wolfspeed.

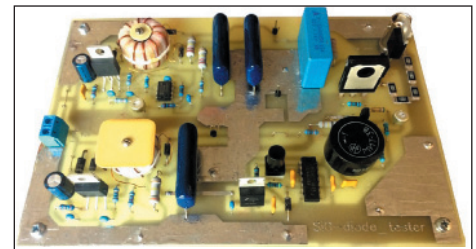


Рис. 1. Тестер для исследования стойкости SiC-диодов Шоттки к скорости нарастания обратного напряжения

В настоящее время ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» проводит работы по улучшению охранной системы SiC-диодов, что даст стойкость к импульсам с dV/dt более 250 В/нс.

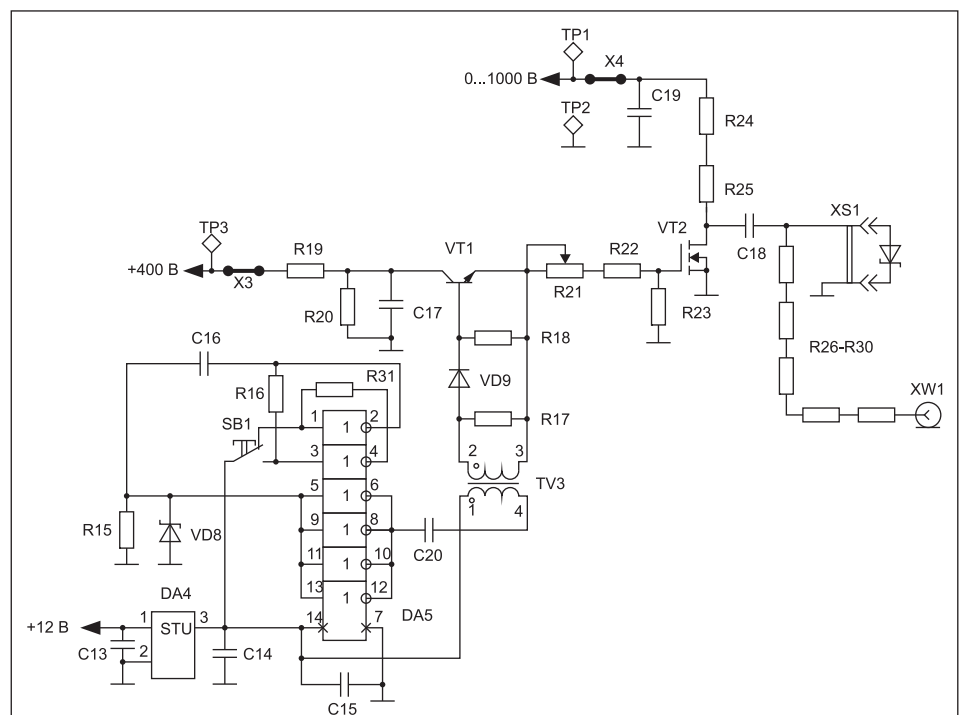


Рис. 2. Схема измерительной части тестера для исследования стойкости SiC-диодов Шоттки к скорости нарастания обратного напряжения

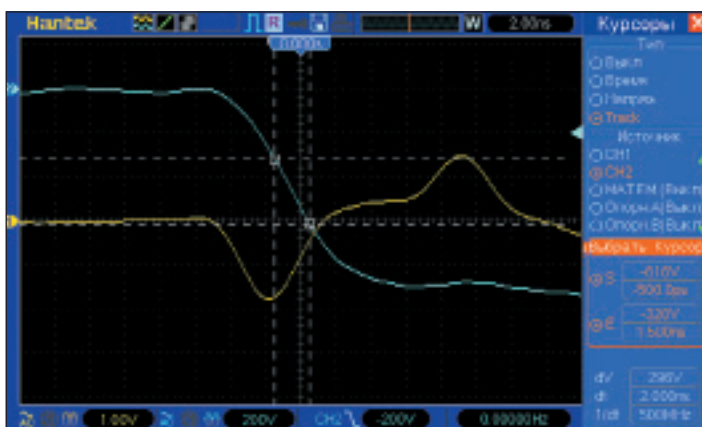


Рис. 3. Осциллограммы напряжения (канал 2) и тока (канал 1) для диода 5ДШ402А9 в корпусе КТ-47 при амплитуде импульса обратного напряжения $V = 900$ В ($dV/dt = 148$ В/нс)

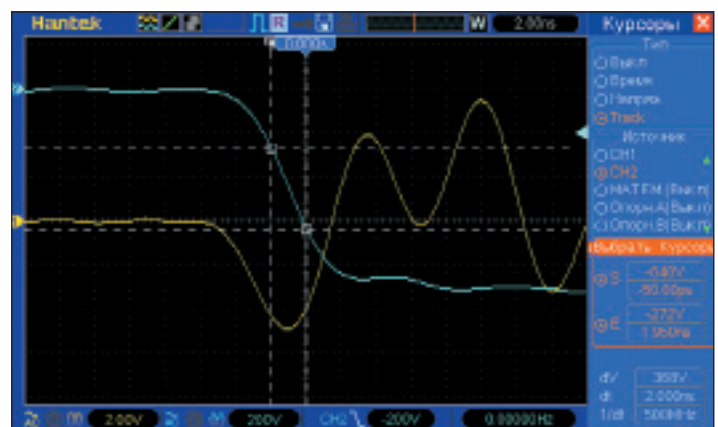


Рис. 4. Осциллограммы напряжения (канал 2) и тока (канал 1) для диода в корпусе КТ-28-1 (при амплитуде импульса обратного напряжения $V = 900$ В ($dV/dt = 184$ В/нс)

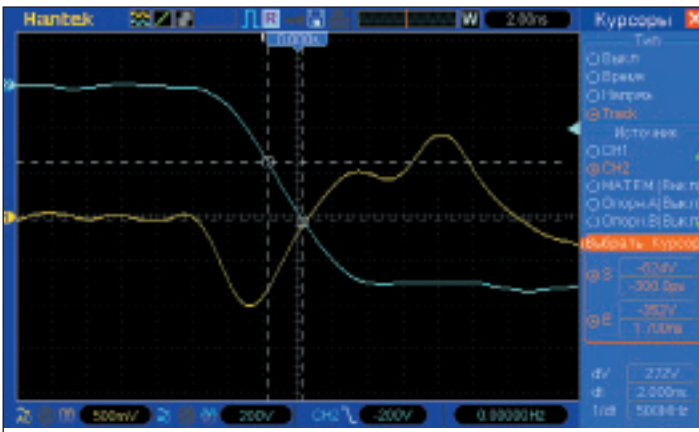


Рис. 5. Осциллограммы напряжения (канал 2) и тока (канал 1) для нового разрабатываемого SiC-диода Шоттки с $V_{пробоя}$ более 1700 В в корпусе КТ-28-1 при амплитуде импульса обратного напряжения $V = 900$ В ($dV/dt = 136$ В/нс)

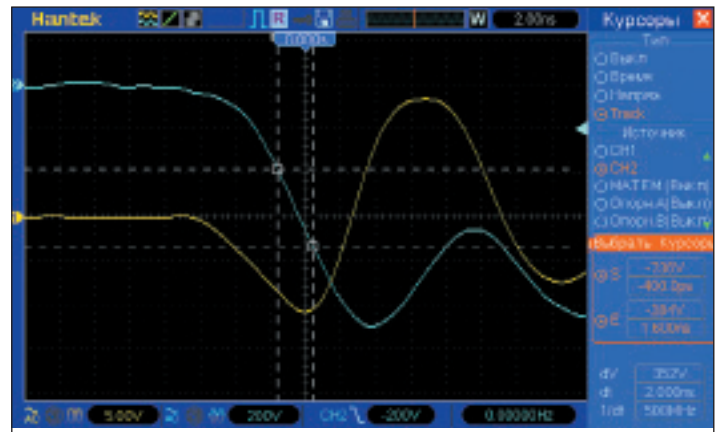


Рис. 6. Осциллограммы напряжения (канал 2) и тока (канал 1) для диода КТ-28А-2.02 (металлокерамический корпус) при амплитуде импульса обратного напряжения $V = 900$ В ($dV/dt = 176$ В/нс)

Заключение

Разработанный отечественный тестер для исследования стойкости SiC-диодов Шоттки к эффекту dV/dt позволил провести исследование SiC-диодов Шоттки производства ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», отличающихся корпусированием и основными параметрами. Выполненный анализ осциллограмм напряжения и тока с разной длительностью сигнала, частотой и количеством импульсов позволил определить, что серийно выпускаемые, а также разрабатываемые ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» новые SiC-диоды Шоттки работоспособны при dV/dt не менее 130 В/нс.

Важно отметить, что фактические возможности исследованных диодов ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» превышают измеренные значения dV/dt и для установления предельной величины параметра dV/dt разрабатывается тестер, позволяющий достичь более 500 В/нс. Также

для исследования больших партий диодов в настоящее время завершается создание автоматического тестера с микропроцессорным управлением на базе контроллера STM32F407, обеспечивающего одновременный контроль стойкости к параметру dV/dt до десяти диодов с программированием амплитуды обратного напряжения (в диапазоне 300–1500 В), скорости нарастания обратного напряжения, частоты импульсов (в диапазоне до 10 кГц) и их количества (1–100 000 импульсов).

Литература

1. Kimoto T., Cooper J. A. Growth, Characterization, Devices, and Applications. Fundamentals of Silicon Carbide Technology. New York, Wiley — IEEE Press, 2014.
2. Иванов П. А., Левинштейн М. Е., Мнацаканов Т. Т., Palmour J. W., Agarwal A. K.

Мощные биполярные приборы на основе карбида кремния // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. № 8.

3. Holz M., Hultsch G., Scherg T., Rupp R. Reliability considerations for recent Infineon SiC diode releases // Microelectronics Reliability. 2007. No. 47.
4. Cree SiC Power White Paper: The Characterization of dV/dt Capabilities of Cree SiC Schottky diodes using an Avalanche Transistor Pulser. Sep. 2015. www.wolfspeed.com/power/tools-and-support/white-papers
5. Карташов Е., Лебедев А. Оценка стойкости диодов Wolfspeed SiC Шоттки к dV/dt с помощью генератора импульсов на основе лавинного транзистора // Силовая электроника. 2016. № 2.
6. SiC Power Devices and Modules. Application Note // ROHM Semiconductor. Issue of August 2014.
7. Wang G., Van Brunt E., Barbieri T., Hull B. et al. On Developing a dV/dt Rating for Commercial 650V- and 1200V-Rated SiC Schottky Diodes. Proceedings of PCIM Europe, Nuremberg, Germany, 2017.
8. Van Brunt E., Wang G., Liu J. et al. Operation of 4H-SiC Schottky diodes at dV/dt values over 700 $kV/\mu s$ // Proceedings of 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Czech Republic, Prague, 2016.

Таблица. Результаты исследования стойкости SiC-диодов Шоттки к скорости нарастания обратного напряжения

SiC-диоды Шоттки ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»	Величина dV/dt при амплитуде импульса обратного напряжения $V = 900$ В, В/нс
5ДШ402А9 в корпусе КТ-47 на 1 А, 1200 В	148
Разрабатываемый диод в корпусе КТ-28-1 на 5 А, 1200 В	184
Разрабатываемый диод в корпусе КТ-28-1 на 5 А, 1700 В	136
Разрабатываемый диод в корпусе КТ-28А-2.02 на 10 А, 1200 В	176

POWER ELECTRONICS



15-я Международная выставка
компонентов и систем
силовой электроники

23-25 октября 2018

Москва, Крокус Экспо

Силовая Электроника

ufi
Approved
Event

Единственная в России
специализированная
выставка компонентов
и систем силовой электроники
для различных отраслей
промышленности

реклама



Организатор
Группа компаний ITE
+7 (812) 380 6003/07/00
power@primexpo.ru

Подробнее о выставке
powerelectronics.ru

12+