

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.

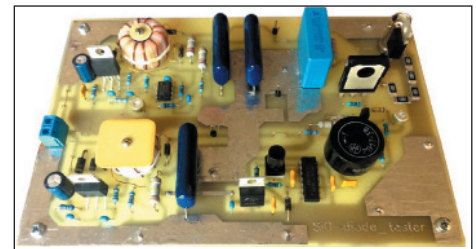


Рис. 1. Тестер для исследования стойкости SiC-диодов Шоттки к скорости нарастания обратного напряжения

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.

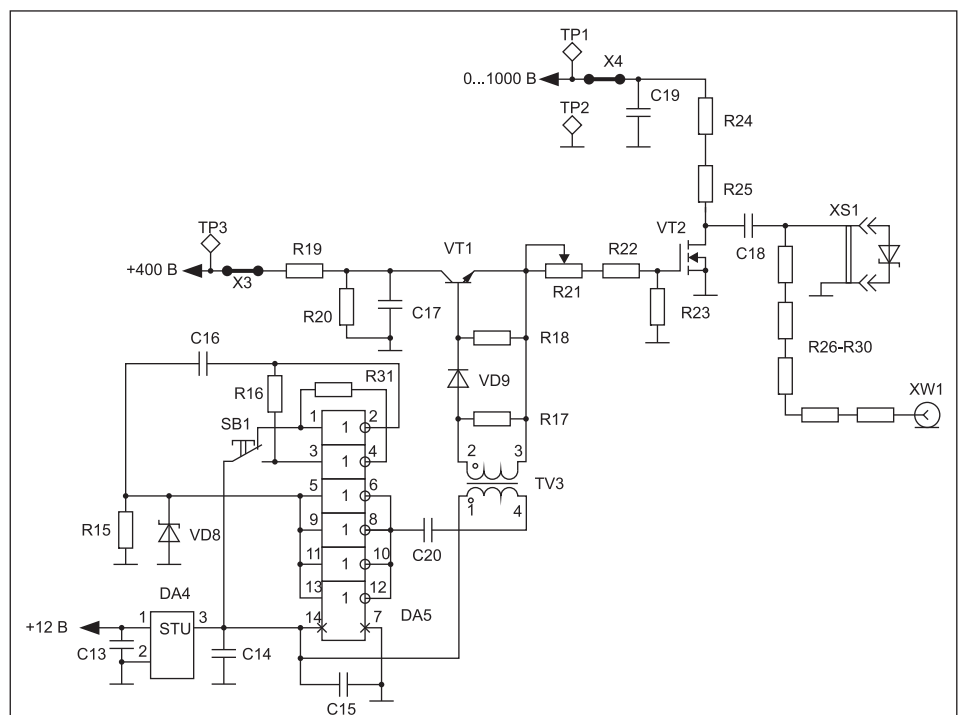


Рис. 2. Схема измерительной части тестера для исследования стойкости SiC-диодов Шоттки к скорости нарастания обратного напряжения

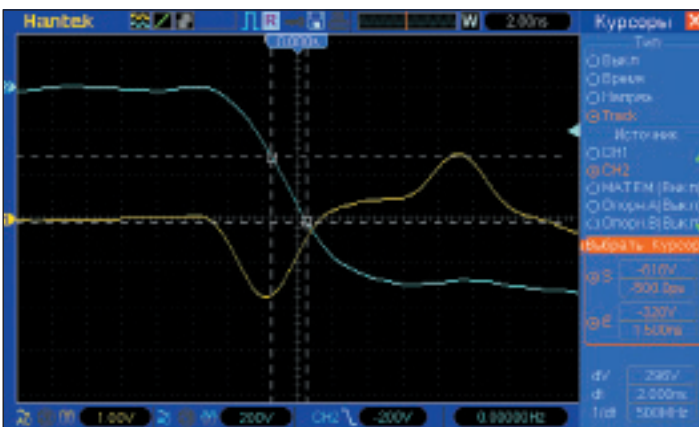


Рис. 3. Осциллограммы напряжения (канал 2) и тока (канал 1) для диода 5ДШ402А9 в корпусе КТ-47 при амплитуде импульса обратного напряжения $V = 900$ В ($dV/dt = 148$ В/нс)

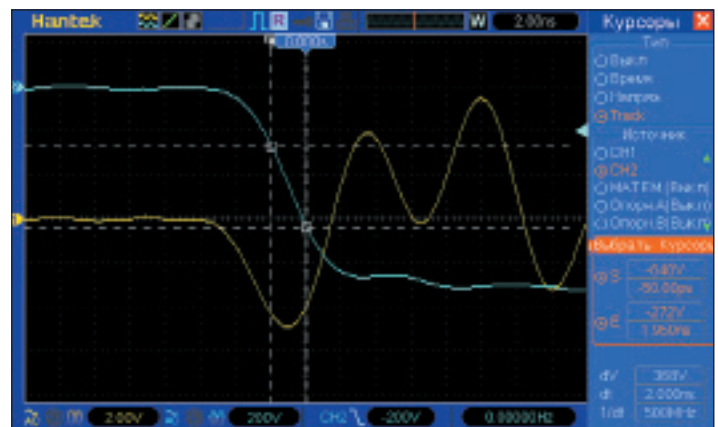


Рис. 4. Осциллограммы напряжения (канал 2) и тока (канал 1) для диода в корпусе КТ-28-1 (при амплитуде импульса обратного напряжения $V = 900$ В ($dV/dt = 184$ В/нс)

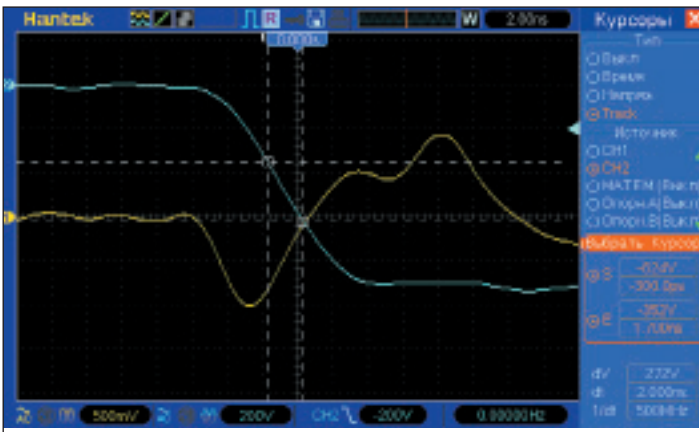


Рис. 5. Осциллограммы напряжения (канал 2) и тока (канал 1) для нового разрабатываемого SiC-диода Шоттки с $V_{\text{пробоя}}$ более 1700 В в корпусе КТ-28-1 при амплитуде импульса обратного напряжения $V = 900$ В ($dV/dt = 136$ В/нс)

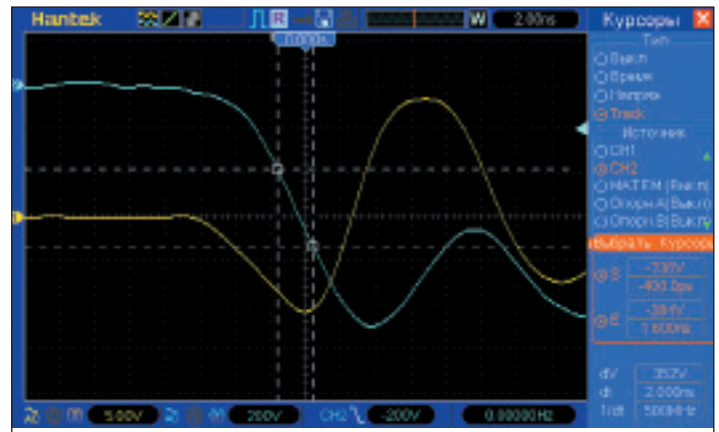


Рис. 6. Осциллограммы напряжения (канал 2) и тока (канал 1) для диода КТ-28А-2.02 (металлокерамический корпус) при амплитуде импульса обратного напряжения $V = 900$ В ($dV/dt = 176$ В/нс)

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 |